



ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ, ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ  
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

---

**ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ ΜΕ  
ΤΗΝ ΒΟΗΘΕΙΑ 3D ΕΚΤΥΠΩΤΗ**

---

**Πτυχιακή εργασία του ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗ ΘΕΟΦΥΛΑΚΤΟΥ 3541**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**  
Δρ. Σπυρίδων Καζαρλής

**ΣΕΡΡΕΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2021**

## I. Περίληψη

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των τελευταίων χρόνων έχει ωθήσει τον κλάδο της ρομποτικής να ενσωματωθεί στην καθημερινότητα των ανθρώπων επιλύοντας προβλήματα και δημιουργώντας προϋποθέσεις βελτίωσης διάφορων συνθηκών στο ανθρώπινο περιβάλλον.

Η ρομποτική αποτελεί έναν κλάδο της τεχνολογίας που συνδυάζει την επιστήμη των υπολογιστών, του προγραμματισμού, της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανοηλεκτρονικής και αποτελεί το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Βασικός στόχος της εργασίας είναι η τρισδιάστατη απεικόνιση ενός ρομποτικού μέλους με τη χρήση 3D εκτυπωτή και ο προγραμματισμός του ώστε να μπορεί να πραγματοποιεί βασικές κινήσεις αντίστοιχες με αυτές που διενεργεί ένα πραγματικό μέλος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο εκτυπωτής Creality Ender 3 και ως υλικό, το οικολογικό βιοπολυμερές PLA, ενώ για τον προγραμματισμό του χεριού επιλέχθηκε ο μικροελεγκτής μονής πλακέτας Arduino. Τέλος, με την χρήση ποτενσιόμετρων και κουμπιών το ρομποτικό χέρι είναι εφικτό να ακολουθήσει τις εντολές και να διενεργήσει τις κινήσεις για τις οποίες έχει προγραμματιστεί. Η εκτύπωση και ο προγραμματισμός του ρομποτικού μέλους πραγματοποιήθηκαν με επιτυχία, υποδεικνύοντας ότι πλέον είναι εφικτό να υλοποιηθούν γρήγορα και οικονομικά τεχνητά άκρα ώστε να αντιμετωπιστούν προβλήματα ασθενών που παρουσιάζουν κάποιου είδους δυσμορφίες ή απώλεια άκρων μετά από ατύχημα

## II. Abstract

The rapid development of technology in recent years has pushed the robotics industry to integrate into people's daily lives by solving problems and creating conditions for the improvement of various conditions in the human environment.

Robotics is a branch of technology that combines computer science, programming and artificial intelligence and is the main object of study of this dissertation. The main goal of the work is the construction of a three-dimensional robotic hand using a 3D printer and its programming so that it can perform basic movements corresponding to those performed by a real human part. For this purpose, the Creality Ender 3 printer was used and as a material, the ecological biopolymer PLA, while for the programming of the hand, the Arduino single board microcontroller was chosen. Finally, the robotic arm performs the movements using potentiometers and buttons which are connected to the Arduino board and follow the required commands. Finally, the printing and programming of the robotic member was successful, indicating that it is now possible to implement fast and cost-effective artificial limbs to treat problems of patients who present any kind of deformity or loss of limbs after an accident.

### III. Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδος υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Σπυρίδωνα Καζαρλή.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον κ. Σπυρίδωνα Καζαρλή για την ανάθεση της μελέτης, το ενδιαφέρον, την συστηματική και εποικοδομητική καθοδήγηση, την στήριξη που επέδειξε καθώς και για τις χρήσιμες συμβουλές κατά την διάρκεια της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και όλους μου τους φίλους για την αγάπη, την ενθάρρυνση, την κατανόηση, την οικονομική και ηθική υποστήριξη τους, σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## IV. Περιεχόμενα

I. Περίληψη .....	1
II. Abstract.....	2
III. Ευχαριστίες .....	3
V. Περιγραφή του αντικειμένου της εργασίας.....	6
VI. Εισαγωγή στην ρομποτική και τα ρομποτικά χέρια.....	6
A. Η ιστορία των ρομπότ.....	6
B. Ιστορική αναδρομή στην ρομποτική.....	7
C. Βικτωριανά Ρομπότ .....	7
D. Είσοδος των ρομπότ από τις βιομηχανίες στις οικίες .....	8
VII. Εισαγωγή στους 3D Εκτυπωτές.....	9
A. Λειτουργία 3D εκτυπωτών.....	10
B. Κατηγορίες νημάτων.....	11
1. Βασικά νήματα - Πολυμερή .....	11
2. Άλλα νήματα - Νάilon .....	13
C. Εφαρμογές.....	13
1. Ιατρική βιομηχανία .....	13
2. Αεροδιαστημική και άμυνα .....	14
3. Αυτοκινητοβιομηχανία.....	14
4. Βιομηχανία τροφίμων .....	14
5. Άλλες εφαρμογές .....	14
VIII. Είδη και τεχνικές εκτύπωσης 3D.....	15
A. Στερεολιθογραφία (SLA).....	15
B. Ψηφιακή Επεξεργασία φωτός (DLP).....	17
C. Μοντελοποίηση απόθεσης (FDM).....	17
D. Επιλεκτική Σύντηξη με λέιζερ (SLS).....	19
E. Επιλεκτική τήξη λέιζερ (SLM).....	20
F. Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM) .....	21
G. Συγκόλληση Επάλληλων φύλλων με laser (LOM).....	21
IX. Τρόπος προσέγγισης και μεθοδολογία για την διεκπεραίωση της εργασίας.....	22
A. Αναζήτηση και αξιολόγηση σχεδίων CAD .....	22
X. Εισαγωγή στους μικροελεγκτές τύπου Arduino.....	24
XI. Περιγραφή των υλικών, των μηχανών και του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν .....	25
A. Παραμετροποίηση των επιλογών στο Cura.....	29
XII. Περιγραφή της πηγής, της μηχανολογικής σχεδίασης και των κομματιών του μηχανικού χεριού που επιλέχθηκαν.....	36
A. Σχέδια κατασκευής .....	37

XIII.	Περιγραφή της διαδικασίας εκτύπωσης ενός κομματιού.....	40
A.	Άνοιγμα των αρχείων STL στο Cura.....	40
B.	Δημιουργία προφίλ εκτύπωσης.....	41
C.	Ορθή τοποθέτηση των αντικείμενων ανάλογα με το σχήμα τους.....	44
D.	Βαθμονόμηση του εκτυπωτή.....	46
E.	Εντολές για την βαθμονόμηση του άξονα Z.....	47
XIV.	Συναρμολόγηση του χεριού.....	48
XV.	Συνδεσμολογία ποτενσιόμετρων led και servo στο Arduino.....	52
A.	Προγραμματίζοντας το Arduino.....	53
XVI.	Παραδείγματα κίνησης του χεριού.....	58
XVII.	Συμπεράσματα από την εκπόνηση της εργασίας.....	60
XVIII.	Προτάσεις για μελλοντική επέκταση.....	61
XIX.	Βιβλιογραφία.....	62

## V. Περιγραφή του αντικειμένου της εργασίας

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιείται η σχεδίαση και η κατασκευή ενός ρομποτικού χεριού, όπου όλα τα κομμάτια του προέρχονται από πλαστικά μέρη εκτυπωμένα από έναν 3D printer, καθώς και ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή Arduino Uno με στόχο να αναπτυχθεί το κατάλληλο λογισμικό έτσι ώστε το χέρι να μπορεί να πραγματοποιεί τις βασικές κινήσεις με την χρήση ποτενσιόμετρων. Η εκτύπωση των αρχικών κομματιών έγινε με την χρήση του εκτυπωτή που διαθέτει ο τομέας Wahnao Duplicator 6 που έχει όγκο εκτύπωσης 200x200x200mm και ακρίβεια τα 20 micron, μπορεί να χειριστεί νήματα διαφορετικών θερμοκρασιών όπως PLA και ABS, και είναι συμβατός με τα λογισμικά Cura και Simplify 3D, αλλά λόγω της πανδημίας του COVID-19 και για να μην διακοπεί η εργασία, συνεχίστηκε με την χρήση του Creality Ender 3 που διαθέτει στην οικία του ο φοιτητής της συγκεκριμένης εργασίας και έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτόν του τμήματος. Ακολούθως, έγινε διασύνδεση των σερβομηχανισμών με τον μικροελεγκτή και ενσωματώθηκε η κατάλληλη τροφοδοσία για τα servo. Τέλος, ο προγραμματισμός έγινε σε C++ στο περιβάλλον του Arduino IDE με στόχο να δίνει στον χρήστη την επιλογή 2 διαφορετικών λειτουργιών, όπου μπορεί να τις εναλλάσσει με την χρήση buttons. Η πρώτη επιλογή αφορά τον χειροκίνητο έλεγχο όλων των άκρων και η δεύτερη είναι μια αυτοματοποιημένη χρήση επίδειξης όλων των βασικών λειτουργιών ενός χεριού.

## VI. Εισαγωγή στην ρομποτική και τα ρομποτικά χέρια

Αν και η επιστήμη της ρομποτικής εμφανίστηκε μόλις τον 20ο αιώνα, η ιστορία των ρομπότ και του αυτοματισμού που εφευρέθηκε από τον άνθρωπο έχει πολύ μακρύτερο παρελθόν. Στον αρχαίο Έλληνα μηχανικό Ήρωνα από την Αλεξάνδρεια, αποδίδονται δυο κείμενα, το Pneumatica και το Automata, που μαρτυρούν την ύπαρξη εκατοντάδων διαφορετικών ειδών μηχανών «θαύματος» ικανών να αυτοματοποιηθούν. Τα συστήματα ρομποτικής από τότε έως σήμερα έχουν πραγματοποιήσει τεράστια άλματα δημιουργώντας έναν τομέα συνεχούς ανάπτυξης και εξέλιξης, ικανό να συμπεριλαμβάνει μηχανές, με δυνατότητες να συναρμολογούν άλλα μηχανήματα, ακόμη και ρομπότ που μπορεί να εκληφθούν ως ανθρώπινα όντα [1].

### A. Η ιστορία των ρομπότ

Ο όρος ρομπότ πρωτοεμφανίζεται σε ένα θεατρικό έργο επιστημονικής φαντασίας του Τσέχου συγγραφέα Κάρελ Τσάπεκ το 1921 και προέρχεται από τη σλαβική λέξη robota που σημαίνει εργασία. Οι συγγραφείς της επιστημονικής φαντασίας, σε όλη την πορεία της ιστορίας, ενδιαφέρονται για την ικανότητα του ανθρώπου να παράγει αυτοκινούμενα μηχανήματα και μορφές ζωής, από τον αρχαίο ελληνικό μύθο του Πυγμαλίωνα έως τον Δρ Frankenstein της Mary Shelley και το HAL 9000 του Arthur C. Clarke. Ουσιαστικά, ένα ρομπότ είναι μια επαναπρογραμματιζόμενη μηχανή που μπορεί να κινηθεί κατά την ολοκλήρωση μιας

εργασίας. Τα ρομπότ χρησιμοποιούν ειδική κωδικοποίηση που τα διαφοροποιεί από άλλα μηχανήματα και εργαλειομηχανές, όπως το CNC [1].

## B. Ιστορική αναδρομή στην ρομποτική

Πολλές πηγές αποδεικνύουν το πόσο δημοφιλής ήταν η δημιουργία αυτοματοποιημένων μηχανισμών στους αρχαίους και μεσαιωνικούς χρόνους. Οι αρχαίοι Έλληνες και οι Ρωμαίοι ανέπτυξαν απλούς αυτοματισμούς με στόχο να τους χρησιμοποιήσουν ως εργαλεία και παιχνίδια είτε και ως μέρος θρησκευτικών τελετών. Γύρω στο 400 π.Χ., ο Έλληνας μαθηματικός Αρχύτας ο Ταραντινός δημιούργησε ένα μηχανικό πουλί για να δοκιμάσει και να κατανοήσει καλύτερα πώς πετούν τα πουλιά [1].

Τον Μεσαίωνα, τόσο στην Ευρώπη όσο και στη Μέση Ανατολή, οι μηχανικοί αυτοματισμοί άρχισαν να εμφανίζονται έντονα στην καθημερινότητα του κόσμου, ακόμα και στις θρησκευτικές τελετές. Ο πολυμαθής Άραβας Al-Jazari (1136-1206) άφησε κείμενα που περιγράφουν και απεικονίζουν τις διάφορες μηχανικές του συσκευές, συμπεριλαμβανομένου ενός μεγάλου ρολογιού ελέφαντα όπου κινούταν και έκανε διάφορους ήχους με το πέρασμα μιας ώρας, ενός μουσικού συγκροτήματος ρομπότ και ενός αυτοματοποιημένου σερβιτόρου που σερβίρει ποτά. Γύρω στο 1495, ο Leonardo DaVinci δημοσιεύει σχέδια για έναν μηχανικό ιππότη. Κατά τα επόμενα 400 χρόνια, κατασκευάζονται διάφορα αυτοματοποιημένα παιχνίδια, που είχαν ως στόχο κυρίως την ψυχαγωγία. Με το πέρασμα των χρόνων δημιουργήθηκαν και άλλες αυτοκινούμενες κατασκευές που έδειχναν κινούμενα ζώα και ανθρωποειδείς μορφές αλλά τον 18ο αιώνα, τα αυτόματα κατανοήθηκαν αρκετά και η τεχνολογία προχώρησε στο σημείο όπου θα μπορούσαν να γίνουν πολύ πιο εξειδικευμένοι μηχανισμοί. Στον Γάλλο μηχανικό Jacques de Vaucanson αποδίδεται η δημιουργία του πρώτου επιτυχημένου βιομηχανικού αυτόματου, μια ανθρώπινη φιγούρα που παίζει φλάουτο. Τα αυτοματοποιημένα συστήματα ήταν τόσο δημοφιλή που ταξίδεψαν στην Ευρώπη διασκεδάζοντας αρχηγούς κρατών [1].

## C. Βικτωριανά Ρομπότ

Η Βιομηχανική Επανάσταση στην Αγγλία κατά την διάρκεια της Βικτωριανής εποχής είχε ως αποτέλεσμα την ραγδαία ανάπτυξη στις επιστήμες όπως τα μαθηματικά και την μηχανική τα οποία αποτέλεσαν πρόδρομο για την ρομποτική. Ο Charles Babbage (1791-1871) εργάστηκε για να αναπτύξει τα θεμέλια της επιστήμης των υπολογιστών στις αρχές έως τα μέσα του δέκατου ένατου αιώνα, με τα πιο επιτυχημένα έργα του να είναι η διαφορική και η αναλυτική μηχανή. Αν και δεν ολοκληρώθηκαν ποτέ λόγω έλλειψης πόρων, αυτά τα δύο μηχανήματα αποτέλεσαν τους ακρογωνιαίους λίθους για τους μηχανικούς υπολογισμούς. Άλλοι όπως η Ada Lovelace αναγνώρισαν τη μελλοντική δυνατότητα των υπολογιστών να δημιουργούν εικόνες ή να παίζουν μουσική [1].

Οι αυτοματισμοί εξακολούθησαν να προσφέρουν ψυχαγωγία κατά τον 19ο αιώνα, αλλά η διαφορά με αυτήν την περίοδο ήταν και η ανάπτυξη μηχανών και κινητήρων ατμού που



βοήθησαν να κάνουν την κατασκευή εξαρτημάτων πολύ πιο αποτελεσματική και γρήγορη. Τα εργοστάσια άρχισαν να χρησιμοποιούν μηχανές είτε για να αυξήσουν το φόρτο εργασίας είτε για ακρίβεια στην παραγωγή πολλών προϊόντων.

#### D. Είσοδος των ρομπότ από τις βιομηχανίες στις οικίες [1]

Το 1920, ο Karel Capek δημοσίευσε το έργο του R.U.R. (Universal Robots του Rossum), στο οποίο εισήγαγε τη λέξη «ρομπότ». Λήφθηκε από μια παλιά σλαβική λέξη που σήμαινε κάτι παρόμοιο με «μονότονη ή καταναγκαστική εργασία». Ωστόσο, χρειάστηκαν περισσότερα από τριάντα χρόνια πριν ξεκινήσει να λειτουργεί το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ. Στη δεκαετία του 1950, ο George Devol σχεδίασε το Unimate, μια ρομποτική συσκευή βραχίονα που μετέφερε χύτευση σε εργοστάσιο General Motors στο Νιου Τζέρσεϋ, το οποίο άρχισε να λειτουργεί το 1961. Η Unimation, η εταιρεία που ο Devol ίδρυσε με τον ρομποτικό επιχειρηματία Joseph Engelberger, ήταν η πρώτη κατασκευαστική εταιρεία ρομπότ. Επίσης στα μέσα της δεκαετίας του 1950, η γερμανική εταιρεία Kuka ανέπτυξε μια αυτοματοποιημένη γραμμή συγκόλλησης για συσκευές, καθώς και μια γραμμή συγκόλλησης πολλαπλών σημείων για τη Volkswagen. Μέχρι το 1968, η Kawasaki είχε αδειοδοτήσει ένα σχέδιο της Unimation ενός υδραυλικού ρομπότ και ξεκίνησε την κατασκευή του. Το 1969, η GM είχε επιτύχει το 90% των συγκολλήσεων πάνω στο σασμάν και στο αμάξωμα των οχημάτων χρησιμοποιώντας βραχίονες Unimate σε ένα από τα εργοστάσιά της. Το 1970, το Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ ανέπτυξε το λεγόμενο Standard Arm, όπως είναι ακόμα γνωστό σήμερα, που χρησιμοποιείται για συναρμολόγηση μικρών ανταλλακτικών και ενσωματώνει ανατροφοδότηση αφής και πίεσης.

Η αυτοματοποιημένη συγκόλληση επρόκειτο να γίνει με την εφαρμογή βιομηχανικών ρομπότ, καθώς οι μηχανές μπορούσαν να παράγουν συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας ακόμα και σε αρκετά απαιτητικές συνθήκες. Η Kuka, το 1973, είχε εισαγάγει τον βραχίονα έξι αξόνων, ο οποίος θα γινόταν βιομηχανικό πρότυπο. Περίπου την ίδια στιγμή που άρχισαν να εμφανίζονται τα πλήρως ηλεκτρικά ρομπότ. Η Cincinnati Milacron παρουσίασε ένα βιομηχανικό ρομπότ ελεγχόμενο από μικροϋπολογιστές για εμπορική χρήση την ίδιο χρονιά. Η δεκαετία του '70 χαρακτηρίστηκε ως η δεκαετία που εμφανίστηκαν οι περισσότερες καινοτομίες: ένα ηλεκτρικό ρομπότ ελεγχόμενο από μικροεπεξεργαστή, ένα ρομπότ εισαγωγής υψηλής ακρίβειας, υψηλότερα ωφέλιμα φορτία, ένα ρομπότ συγκόλλησης με βάση αισθητήρες, το ρομπότ PUMA για συναρμολόγηση μικρών ανταλλακτικών, καθώς και η ανάπτυξη του Selectively Compliant (SCARA) βραχίονα.

Το 1980, στο Πανεπιστήμιο του Ρόουντ Άιλαντ έγινε η πρώτη επίδειξη μηχανικής όρασης. Η GM θα έθετε τρία ρομπότ σε λειτουργία τον επόμενο χρόνο για να ταξινομήσουν διαφορετικών ειδών μέταλλα με μηχανική όραση.

Ένα χρόνο αργότερα παρουσιάζετε το ρομπότ SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), το οποίο είναι ένας ρομποτικός βραχίονας που κινησιολογικά είναι πιο κοντά στο ανθρώπινο χέρι και επιτρέπει την φόρτωση και εκφόρτωση αντικειμένων σε πολύ πιο γρήγορους ρυθμούς για την εποχή.

Πολλοί έμειναν έκπληκτοι το 2003 από τα κατορθώματα των ρομποτικών οχημάτων της NASA Spirit and Opportunity να εξερευνήσουν την επιφάνεια του Άρη. Το 2004 πραγματοποιήθηκε συγχρονισμός τεσσάρων ρομπότ και συνολικά 38 άξονες δούλεψαν ταυτόχρονα. Τον επόμενο χρόνο, εμφανίστηκε το πρώτο “teach pendant”, μια συσκευή που μπορούσε να δώσει εντολές στο ρομπότ για να κινείται με μεγαλύτερη ασφάλεια και ακρίβεια. Το επόμενο διάστημα, σημειώθηκαν μεγάλες εξελίξεις πάνω στην μείωση του βάρους, την χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου, στις ταχύτητες και στον συγχρονισμό πολλαπλών αξόνων.

Τα ρομπότ ως οικιακές συσκευές, εμφανίζονται το 2003, με την εισαγωγή της ρομποτικής σκούπας Roomba στην αγορά να παρουσιάζει 37.000 πωλήσεις τον χρόνο αυτό, ενώ εξίσου σημαντικές πωλήσεις εμφανίζει η αυτόματη γλοοκοπτική μηχανή με 570.000 καταναλωτές να την επιλέγουν. Μέχρι το 2009 η ανάπτυξη αυτόνομων βιομηχανικών οχημάτων είχε εξελιχθεί σημαντικά, και στις αρχές της επόμενης δεκαετίας, το 2013, εμφανίστηκαν τα συνεργατικά ρομπότ, γνωστά ως και COBOTS, σχεδιασμένα να συνεργάζονται με το ανθρώπινο δυναμικό που δουλεύει στη βιομηχανία. Μέχρι τον επόμενο χρόνο, τα AMR, (Autonomous Mobile Robots), αποτελούν απαραίτητο εργαλείο στις μεγαλύτερες ανά τον κόσμο αποθήκες. Το 2015 η Omron Electronics αγόρασε την Adept Technologies, η οποία είχε δημιουργηθεί από πρώην εργαζόμενους της Unimation, της πρώτης εταιρείας ρομπότ. Η ραγδαία ανάπτυξη και εφαρμογή της ρομποτικής επιστήμης θα οδηγήσει και άλλες εταιρίες να προβούν σε τέτοιες επενδύσεις τα επόμενα χρόνια.

Κατά τη διάρκεια του τελευταίου μισού αιώνα, τα ρομπότ έχουν βρει θέση σε πολλούς τομείς, όπως παιχνίδια και ψυχαγωγία, στρατιωτικά όπλα, βοηθοί αναζήτησης και διάσωσης έχοντας εξαλείψει τον ανθρώπινο παράγοντα σε επαγγέλματα που μέχρι πρότινος ήταν απαραίτητος. Ουσιαστικά, καθώς ο προγραμματισμός και η τεχνολογία βελτιώνονται, τα ρομπότ βρίσκουν τον δρόμο τους σε πολλές θέσεις εργασίας που στο παρελθόν ήταν πολύ επικίνδυνες, ή ακόμα και αδύνατες για τους ανθρώπους.

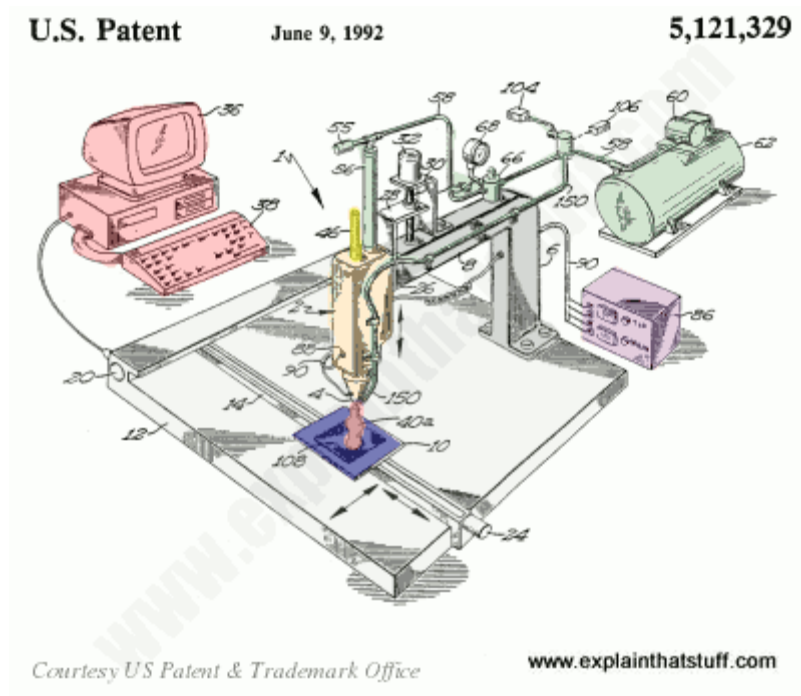
## VII. Εισαγωγή στους 3D Εκτυπωτές

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια διαδικασία που έχει τη δυνατότητα δημιουργίας φυσικών αντικειμένων από μια γεωμετρική αναπαράσταση με διαδοχική προσθήκη υλικού. Αυτή η διαδικασία έχει αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια [2]. Σήμερα η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή τεχνητών αντλιών καρδιάς, κοσμημάτων, κινητήρων πυραύλων PGA καθώς και άλλων προϊόντων που σχετίζονται με την βιομηχανία τροφίμων, την αεροπορική βιομηχανία και την κατασκευή κτιρίων [3].

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές δημιουργήθηκαν για την διευκόλυνση της κατασκευής μοντέλων, των οποίων η κατασκευή με το χέρι απαιτεί πολύ χρόνο. Οι εκτυπωτές αυτοί λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με αυτόν των συμβατικών εκτυπωτών (inkjets), δημιουργώντας επίπεδα τρισδιάστατων δομών απευθείας από σχέδιο στον υπολογιστή (CAD) [4]. Πριν χρησιμοποιηθεί ο σχεδιασμός με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) και τα λέιζερ, τα μοντέλα και οι πρωτότυπες κατασκευές κατασκευάζονταν είτε από ξύλο είτε από μικρά κομμάτια πλαστικό. Η συγκεκριμένη διαδικασία ήταν χρονοβόρα καθώς και δαπανηρή, ειδικά σε

περιπτώσεις όπου το έργο ήταν μεγάλο. Η λύση στο πρόβλημα αυτό εμφανίστηκε το 1980, όπου η βελτίωση της τεχνολογίας ανέπτυξε μια ιδέα που ονομάζεται γρήγορο πρωτότυπο (Rapid Prototype) που δηλώνει ανάπτυξη μοντέλων και πρωτοτύπων με πιο αυτοματοποιημένες μεθόδους, συνήθως σε ώρες ή ημέρες αντί για τις εβδομάδες που ένα παραδοσιακό έργο θα χρειαζόταν. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια λογική επέκταση αυτής της ιδέας στην οποία οι σχεδιαστές προϊόντων κατασκευάζουν τα δικά τους γρήγορα πρωτότυπα, σε ώρες, χρησιμοποιώντας εξελιγμένα μηχανήματα [4]. Χρησιμοποιώντας 3D τεχνολογία μπορούν πλέον να εκτυπωθούν υλικά όπως συμβατικά θερμοπλαστικά, κεραμικά, υλικά με βάση τον γραφίτη καθώς και μέταλλα [5].

### A. Λειτουργία 3D εκτυπωτών



Εικόνα 1: Ένας από τους πρώτους τρισδιάστατους εκτυπωτές FDM στον κόσμο, που αναπτύχθηκε από τον S. Scott Crump τη δεκαετία του 1980. Σε αυτό το σχέδιο, το μοντέλο (ροζ, 40) εκτυπώνεται σε μια πλάκα βάσης (σκουρό μπλε, 10) που κινείται στις οριζόντιες κατευθύνσεις, ενώ η κεφαλή εκτύπωσης και το ακροφύσιο (2 και 4, πορτοκαλί) κινούνται στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Η πρώτη ύλη για εκτύπωση προέρχεται από μια πλαστική ράβδο (κίτρινη, 46), λιωμένη από την κεφαλή εκτύπωσης. Η διαδικασία θέρμανσης ρυθμίζεται προσεκτικά από ένα θερμοστοιχείο (ηλεκτρικός αισθητήρας θερμότητας) συνδεδεμένος σε έναν ελεγκτή θερμοκρασίας (μωβ, 86). Η ράβδος εξωθείται χρησιμοποιώντας πεπιεσμένο αέρα από τη μεγάλη δεξαμενή και συμπιεστή στα δεξιά (πράσινο, 60/62). Τα πράγματα έχουν αλλάξει λίγο από τότε, αλλά η βασική αρχή (δημιουργία ενός αντικειμένου με τήξη και απόθεση πλαστικού υπό τρισδιάστατο έλεγχο) παραμένει η ίδια [4].

Ένας τυπικός τρισδιάστατος εκτυπωτής μοιάζει πολύ με έναν εκτυπωτή inkjet που λειτουργεί από έναν υπολογιστή. Δημιουργεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο ένα στρώμα κάθε φορά, από κάτω προς τα πάνω, εκτυπώνοντας επανειλημμένα πάνω στην ίδια περιοχή με μια μέθοδο

γνωστή ως Fused Depositional Modeling (FDM). Στην Εικόνα 1 ένα παρουσιάζεται ένας από τους πρώτους τρισδιάστατους εκτυπωτές FDM καθώς και τρόπος λειτουργίας του. Η μέθοδος αυτή δεν είναι ο μοναδικός τρόπος δημιουργίας 3D μοντέλων αλλά είναι η πιο διαδεδομένη. Ο εκτυπωτής δημιουργεί το μοντέλο με τον τρόπο με τον οποίο έχει προγραμματιστεί, εκτυπώνοντας λεπτές στρώσεις λιωμένου πλαστικού την μία πάνω στην άλλη μέχρι να δημιουργηθεί το τελικό σχέδιο. Αντί να χρησιμοποιεί μελάνι, το οποίο δεν θα μπορούσε ποτέ να ανεβάσει πολύ όγκο, ο εκτυπωτής εναποθέτει στρώματα λιωμένου πλαστικού ή σκόνης και τα συγχωνεύει μαζί με κόλλα ή υπεριώδες φως [4].

## B. Κατηγορίες νημάτων

### 1. Βασικά νήματα - Πολυμερή

Τα νήματα που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι θερμοπλαστικά, τα οποία είναι πλαστικά (γνωστά και ως πολυμερή) που λιώνουν και δεν καίγονται όταν θερμαίνονται. Αντιθέτως τα συγκεκριμένα νήματα μπορούν να σχηματιστούν, να μορφοποιηθούν και να στερεοποιηθούν όταν ψυχθούν. Το νήμα τροφοδοτείται σε ένα θάλαμο θέρμανσης στη μονάδα εξωθητή του εκτυπωτή, όπου θερμαίνεται στο σημείο τήξης του. Στη συνέχεια εξωθείται (ψεκασμός) μέσω ενός μεταλλικού ακροφυσίου, καθώς κινείται το συγκρότημα εξωθητή, ακολουθώντας μια διαδρομή για την οποία έχει προγραμματιστεί, και τελικά επίπεδο προς επίπεδο κατασκευάζεται το επιθυμητό αντικείμενο. Παρόλο που οι περισσότεροι εκτυπωτές 3D διαθέτουν έναν μόνο εξωθητή, υπάρχουν μερικά μοντέλα διπλού εξωθητή που μπορούν να εκτυπώσουν ένα αντικείμενο σε διαφορετικά χρώματα ή με διαφορετικούς τύπους νημάτων [6].

Τα νήματα συνήθως πωλούνται σε καρούλια των οποίων το βάρος κυμαίνεται από 0.5 έως 2 κιλά, ενώ το πάχος τους είναι 1.75 ή 3mm. Τα περισσότερα νήματα είναι τύπου 1.75mm, ενώ τα τύπου 3mm χρησιμοποιείται κυρίως από τους κατασκευαστές Ultimaker και LulzBot [6]. Τα νήματα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), το συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS), το πολυπροπυλένιο (PP) και το πολυαιθυλένιο (PE). Άλλα νήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι το PEEK και PMMA, τα οποία έχουν υψηλότερες θερμοκρασίες τήξης και είναι πιο ανθεκτικά. Παρ' όλ' αυτά, στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται ευρέως πολυμερή με χαμηλό σημείο τήξης λόγω χαμηλότερου κόστους και μεγαλύτερης ευκαμψίας [7]. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ιδιότητες όλων των θερμοπλαστικών υλικών και η αντίστοιχη εφαρμογή τους στο χώρο της βιομηχανίας.

Πίνακας 1: Ιδιότητες και εφαρμογές θερμοπλαστικών υλικών [8]

Υλικό	Ιδιότητες	Εφαρμογές
ABS	Σκληρό, δυνατό	Αυτοκινητοβιομηχανία, Αεροδιαστημική, Ιατρικές συσκευές

PLA	Αντοχή σε εφελκυσμό, ποιότητα επιφάνειας	Ιδανικό για μοντέλα και πρωτότυπα που απαιτούν αισθητική λεπτομέρεια, φιλικό προς το περιβάλλον ιδανικό για το σπίτι
PC	Αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε κάμψη	Λειτουργικά πρωτότυπα, εργαλεία και φωτιστικά, ιδανικά για την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική
PPSF/PPSU	Αντοχή σε χημικά και θερμότητα, μηχανική αντοχή	Ανθεκτικό σε μεθόδους αποστείρωσης (πχ ακτινοβολία). Ιδανικό για αποστειρώσιμα ιατρικά βοηθήματα, πρωτότυπα αυτοκινήτων και εργαλεία.
Nylon 12	Χημική αντοχή, υψηλή αντοχή κρούσης	Ιδανικό για καλύμματα κεραιών, εργαλεία, εξαρτήματα στην αυτοκινητοβιομηχανία και αεροδιαστημική.
TPU	Αντοχή στο σκίσιμο και στην φθορά, υψηλή αντοχή κρούσης, σκληρότητα	Ποικιλία βιομηχανικής χρήσης.

Μέχρι στιγμής, οι πιο συνηθισμένοι τύποι νημάτων είναι το ABS και το PLA. Οι περισσότεροι βασικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν αποκλειστικά αυτά τα νήματα. Αυτό γίνεται κυρίως διότι είναι οικονομικά και κοστίζουν 15-17€/kg [9].

Αν και δεν είναι ευρύτερα γνωστό το χημικό όνομα του ABS είναι το ίδιο πλαστικό που χρησιμοποιείται στα Lego. Τα αντικείμενα που εκτυπώνονται από το ABS είναι σκληρά, ανθεκτικά και μη τοξικά. Έχει σχετικά υψηλό σημείο τήξης, με θερμοκρασία εκτύπωσης που κυμαίνεται από 210 βαθμούς έως 260°C. Οι κάτω γωνίες των αντικειμένων που εκτυπώνονται με ABS έχουν την τάση να κυρτώνουν λίγο προς τα πάνω, ειδικά εάν χρησιμοποιείται μη θερμαινόμενη τράπεζα εκτύπωσης. Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, το ABS μπορεί να εκπέμψει μια έντονη, δυσάρεστη οσμή, οπότε πρέπει να χρησιμοποιείται με έναν εκτυπωτή κλειστού πλαισίου σε ένα καλά αεριζόμενο δωμάτιο [6].

Το PLA έχει σχετικά χαμηλό σημείο τήξεως, με ωφέλιμες θερμοκρασίες μεταξύ 180 και 230°C. Είναι φυτικό και βιοαποικοδομήσιμο. Είναι πιο ανθεκτικό από το ABS, εκτυπώνει χωρίς στρέβλωση και γενικά είναι εύκολο να εργαστεί, αν και σε σπάνιες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει εμπλοκές στον εξωθητή [6].

## 2. Άλλα νήματα - Νάιλον

Το νάιλον είναι ένα ευέλικτο συνθετικό υλικό, που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1930, και έχει χρησιμοποιηθεί σε πάρα πολλά είδη, από οδοντόβουρτσες έως αλεξίπτωτα και ελαστικά ενώ πλέον χρησιμοποιείται και ως νήμα τρισδιάστατου εκτυπωτή. Επιπλέον ανήκει στην κατηγορία των πολυμερών ή πιο συγκεκριμένα των πλαστικών. Είναι σκληρό και ανθεκτικό, αλλά ευέλικτο, και αποτελεί το συνηθέστερο νήμα για επαγγελματική χρήση. Λιώνει σε υψηλότερη θερμοκρασία (190 - 350°C [10]) από τα περισσότερα νήματα. Δεν έχουν κατασκευαστεί όλοι οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές για να χειρίζονται αυτή τη θερμότητα, ενώ ορισμένες ουσίες που χρησιμοποιούνται συνήθως στον εξωθητή εκπέμπουν αναθυμιάσεις σε αυτήν τη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, συνίσταται η χρήση θερμαινόμενων τραπεζών εκτύπωσης [11].

## C. Εφαρμογές

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μία τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing, AM) με ευρεία γκάμα εφαρμογών στην βιομηχανία. Είναι ένας ανερχόμενος κλάδος που έχει ήδη συνεισφέρει αρκετά στην ανάπτυξη και παραγωγή νέων προϊόντων καθώς και πολλά υποσχόμενος για το μέλλον της βιομηχανίας. Παρακάτω παρουσιάζονται εκτενέστερα ορισμένες από τις εφαρμογές του 3D printing στο χώρο της βιομηχανίας.

### 1. Ιατρική βιομηχανία

Η τεχνολογία της 3D εκτύπωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την 3D εκτύπωση πολλών βιοιατρικών προϊόντων, όπως δέρματος, οστών, χόνδρων και ιστών, ακόμα και ολόκληρων οργάνων [2]. Έχει συμβάλει επίσης στην έρευνα και ανάπτυξη νέων φαρμάκων, στην έρευνα κατά του καρκίνου σχεδιάζοντας ολόκληρα μοντέλα πρωτεϊνών [12], αλλά και στον εκπαιδευτικό τομέα. Τα πλεονεκτήματα της 3D εκτύπωσης είναι πολλά και κάποια από αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Μπορεί να αναπαράγει την φυσική δομή του δέρματος με χαμηλό κόστος με στόχο την χρήση του στην δοκιμή φαρμακευτικών προϊόντων, καλλυντικών αλλά και πολλών χημικών, ώστε να αποφευχθεί η χρήση ζώων για τον σκοπό αυτό [13].
- Μπορεί να δημιουργήσει ανατομικά μοντέλα τα οποία είναι απαραίτητα για την προετοιμασία χειρουργικών επεμβάσεων αλλά ακόμα και για την εκπαίδευση των ιατρών [14]. Τα μοντέλα αυτά φτιάχνονται με χαμηλό κόστος και βοηθάνε στην αποφυγή λαθών κατά τις χειρουργικές επεμβάσεις.
- Αναδόμηση ιστών, οργάνων και οστών, τεχνική η οποία πρόκειται να ελαχιστοποιήσει την απόρριψη τους από τους οργανισμούς των ασθενών, όπως συχνά συμβαίνει μετά την μεταμόσχευση [14].

## 2. Αεροδιαστημική και άμυνα

Στην αεροδυναμική βιομηχανία, η τεχνολογία 3D εκτύπωσης έχει τη δυνατότητα κατασκευής ελαφριών εξαρτημάτων με βελτιωμένες και πολύπλοκες γεωμετρίες, μειώνοντας έτσι τις ενεργειακές ανάγκες καθώς επίσης και τους απαιτούμενους πόρους [2]. Ταυτόχρονα, υπάρχει εξοικονόμηση καυσίμου λόγω της μείωσης του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ανταλλακτικών αεροσκαφών. Ανταλλακτικά τα οποία απαιτούν τακτική αντικατάσταση, όπως ο κινητήρας, είναι πλέον εύκολο να παραχθούν με την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, γρηγορότερα και με χαμηλότερο κόστος.

## 3. Αυτοκινητοβιομηχανία

Στην αυτοκινητοβιομηχανία η τεχνική 3D εκτύπωσης έχει κάνει μεγάλη πρόοδο, επιτρέποντας νέες, ελαφρύτερες και πιο πολύπλοκες κατασκευές σε σύντομο χρόνο. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα, μεγάλων βιομηχανικών εταιριών που έχουν χρησιμοποιήσει την συγκεκριμένη τεχνική για την δημιουργία οχημάτων προς διευκόλυνση του καταναλωτή. Για παράδειγμα, η εταιρία Local Motor έχει εκτυπώσει το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο αλλά ακόμη και ένα τρισδιάστατο λεωφορείο χωρίς οδηγό, ηλεκτρικό, ανακυκλώσιμο και εξαιρετικά «έξυπνο», εν ονόματι OLLI. Επιπλέον, η Ford, η BMW και η AUDI είναι άλλες γνωστές εταιρίες που πρωτοτύπησαν στη χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας με την κατασκευή ανταλλακτικών κινητήρα, εργαλείων χειρός και πρωτοτύπων (concept cars - prototypes) αντίστοιχα [2].

## 4. Βιομηχανία τροφίμων

Η ανάγκη για την ανάπτυξη προσαρμοσμένων τροφίμων για εξειδικευμένες διατροφικές συνήθειες, όπως αυτές των αθλητών, των παιδιών, των εγκύων και των ασθενών, γίνεται όλο και μεγαλύτερη τα τελευταία χρόνια. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία 3D εκτύπωσης, συγκεκριμένα υλικά μπορούν να αναμιχθούν και να επεξεργαστούν σε διάφορες περίπλοκες δομές και σχήματα. Η ζάχαρη, η σοκολάτα, το πολτοποιημένο φαγητό και τα επίπεδα τρόφιμα όπως ζυμαρικά, πίτσα και κράκερ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία νέων ειδών διατροφής [2]. Η χρήση λοιπόν της τεχνολογίας 3D εκτύπωσης στην παραγωγή τροφίμων πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή και λεπτομέρεια ώστε να μην αποτελεί κίνδυνο για την υγεία του καταναλωτή.

## 5. Άλλες εφαρμογές

Άλλοι κλάδοι στους οποίους βρίσκει εφαρμογή η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η αρχιτεκτονική και κατασκευαστική βιομηχανία και η βιομηχανία μόδας [2]. Συγκεκριμένα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση οικοδομικών υλικών ή ακόμα και ολόκληρων κτιρίων. Οι κατασκευαστικές εταιρίες έχουν πλέον την δυνατότητα να σχεδιάσουν

και να κατασκευάσουν οπτικές κτηρίων γρήγορα και οικονομικά, τα οποία είναι πιο ρεαλιστικά σε σχέση με τον σχεδιασμό στο χαρτί. Τέλος, στη βιομηχανία μόδας, εταιρίες όπως η Nike, New Balance και Adidas έχουν δοκιμάσει την παραγωγή παπουτσιών από τρισδιάστατους εκτυπωτές, στην οποία δεν είναι απαραίτητη η χρήση καλουπιών [2].

## VIII. Είδη και τεχνικές εκτύπωσης 3D

Η 3D εκτύπωση είναι ένας όρος που περιγράφει σύνολο τεχνολογιών που δημιουργούν τρισδιάστατα αντικείμενα με την προσθήκη επάλληλων στρωμάτων υλικού, όπως ήδη έχει διατυπωθεί. Τα υλικά μπορούν να διαφέρουν από τεχνολογία σε τεχνολογία. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες κοινές λειτουργίες, όπως η χρήση υπολογιστή μαζί με ειδικό λογισμικό μοντελοποίησης 3D. Το πρώτο βήμα στη διαδικασία αυτή είναι η δημιουργία ενός σκίτσου CAD. Στη συνέχεια, η συσκευή εκτύπωσης διαβάζει δεδομένα από το αρχείο CAD και ξεκινάει η διαδικασία προσθήκης επάλληλων στρωμάτων από υλικό εκτύπωσης, το οποίο μπορεί να είναι πλαστικό, υγρό, σκόνη ή ακόμη και φύλλο χαρτιού.

Υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι εκτύπωσης 3D που αναπτύχθηκαν για την κατασκευή τρισδιάστατων δομών και αντικειμένων. Μερικές από αυτές είναι αρκετά δημοφιλείς σήμερα, ενώ άλλες έχουν εκλείψει στο πέρασμα των χρόνων. Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζονται παρακάτω και θα αναλυθούν εκτενέστερα στις επόμενες υποενότητες:

- Στερεολιθογραφία - Stereolithography(SLA)
- Ψηφιακή επεξεργασία φωτός - Digital Light Processing(DLP)
- Μοντελοποίηση απόθεσης - Fused deposition modeling (FDM)
- Επιλεκτική Σύντηξη (Συσσωμάτωση) με laser - Selective Laser Sintering (SLS)
- Επιλεκτική τήξη με laser - Selective laser melting (SLM)
- Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων - Electronic Beam Melting (EBM)
- Συγκόλληση Επάλληλων φύλλων με laser - Laminated object manufacturing (LOM)

### A. Στερεολιθογραφία (SLA)

Η Στερεολιθογραφία πρόκειται για την παλαιότερη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αλλά χρησιμοποιείται ακόμη στις μέρες μας και είναι ιδιαίτερα δημοφιλής. Αυτή η μέθοδος κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Charles Hull, συνιδρυτή της 3D Systems, Inc το 1986. Η διαδικασία εκτύπωσης περιλαμβάνει μια μοναδικά σχεδιασμένη μηχανή εκτύπωσης 3D που ονομάζεται συσκευή στερεολιθογραφίας (SLA), η οποία μετατρέπει υγρό πλαστικό σε στερεά αντικείμενα 3D [15].

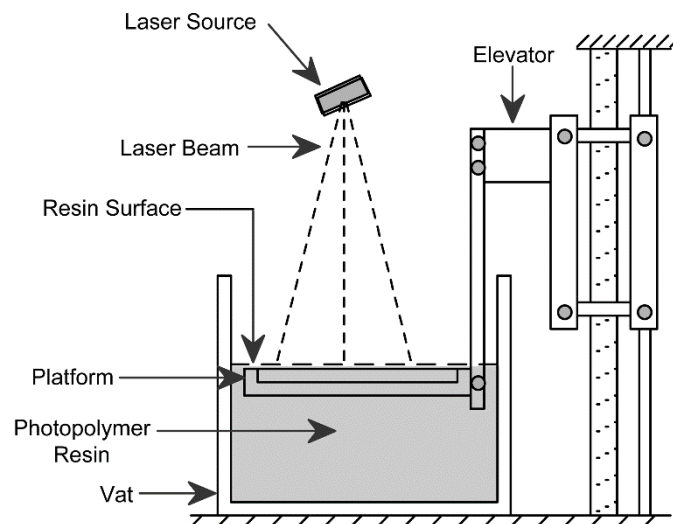
Τα μηχανήματα εκτύπωσης SLA δεν λειτουργούν όπως οι συνηθισμένοι εκτυπωτές που εξάγουν κάποια ποσότητα μελανιού σε μια κόλλα χαρτιού. Οι εκτυπωτές SLA λειτουργούν με χρήση υγρού πλαστικού που μετά από κάποιο χρονικό διάστημα σκληραίνει και μετατρέπεται σε στερεό αντικείμενο. Κομμάτια κατασκευασμένα με 3D εκτυπωτές αυτού του τύπου



συνήθως έχουν λείες επιφάνειες, αλλά η ποιότητά τους εξαρτάται πολύ από την ποιότητα της μηχανής SLA που χρησιμοποιείται [15].

Η διαδικασία εκτύπωσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου στο πρόγραμμα CAD. Ένα ειδικό κομμάτι λογισμικού επεξεργάζεται το μοντέλο CAD και δημιουργεί αρχείο STL που περιέχει πληροφορίες για κάθε επίπεδο. Θα μπορούσαν να υπάρχουν έως και δέκα στρώματα ανά χιλιοστό.
2. Η μηχανή SLA εκθέτει το υγρό πλαστικό και το λέιζερ αρχίζει να σχηματίζει τις στρώσεις του αντικειμένου. Αρχικά ο ανελκυστήρας βρίσκεται σε μια απόσταση από την επιφάνεια του ρευστού ίση με το πάχος του πρώτου στρώματος. Η ακτίνα λέιζερ σαρώνει την επιφάνεια και το φωτοπολυμερές με τις υπεριώδεις ακτίνες λέιζερ στερεοποιείται.
3. Ο ανελκυστήρας μετακινείται προς τα πάνω και με την ίδια διαδικασία παράγεται το επόμενο στρώμα.
4. Μόλις εκτυπωθούν όλα τα στρώματα, το αντικείμενο πρέπει να ξεπλυθεί με διαλύτη και στη συνέχεια να τοποθετηθεί σε φούρνο υπεριώδους φωτός για να ολοκληρωθεί η επεξεργασία.



Εικόνα 2: Διάγραμμα λειτουργίας SLA εκτυπωτή [16]

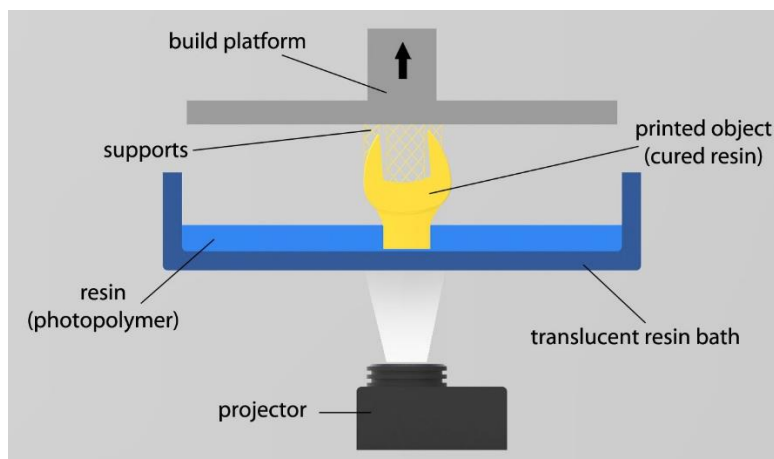
Ο χρόνος που απαιτείται για την εκτύπωση ενός αντικειμένου εξαρτάται από το μέγεθος των εκτυπωτών SLA που χρησιμοποιούνται. Τα μικρά αντικείμενα μπορούν να εκτυπωθούν εντός 6-8 ωρών με μια μικρή μηχανή εκτύπωσης ενώ τα μεγάλα αντικείμενα μπορούν να είναι αρκετά μέτρα σε τρεις διαστάσεις και ο χρόνος εκτύπωσης μπορεί να είναι αρκετές ημέρες [15].

Η Στερεολιθογραφία χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή πρωτοτύπων καθώς δεν απαιτεί πολύ χρόνο για την παραγωγή ενός αντικειμένου και το κόστος είναι σχετικά μικρό σε σύγκριση με άλλα μέσα παραγωγής πρωτοτύπων. Τέλος, η συγκεκριμένη μέθοδος 3D εκτύπωσης χρησιμοποιείται σπάνια για την εκτύπωση του τελικού προϊόντος [15].

## B. Ψηφιακή Επεξεργασία φωτός (DLP)

Η Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός είναι μια άλλη διαδικασία 3D εκτύπωσης παρόμοια με τη Στερεολιθογραφία. Η τεχνολογία DLP δημιουργήθηκε το 1987 από τον Larry Hornbeck της Texas Instruments και έγινε πολύ δημοφιλής στην παραγωγή Projectors. Χρησιμοποιεί ψηφιακούς μικρο καθρέφτες που έχουν τοποθετηθεί σε ένα τσιπ ημιαγωγών και βρίσκει εφαρμογή στους προβολείς ταινιών, στα κινητά τηλέφωνα και εκτύπωση 3D.

Όπως ακριβώς και οι SLA εκτυπωτές, οι DLP είναι κατασκευασμένοι γύρω από μία δεξαμενή ρητίνης, μια πλατφόρμα κατασκευής που συνδέεται με τον ανελκυστήρα και κατεβαίνει προς την πλατφόρμα δημιουργώντας τα στρώματα υλικού. Η διαφορά με την μέθοδο SLA είναι η πηγή φωτός. Η μέθοδος DPL χρησιμοποιεί μια συσκευή ψηφιακού προβολέα για να προβάλει την εικόνα κάθε στρώματος σε ολόκληρη την πλατφόρμα. Επομένως, η εικόνα κάθε στρώματος αποτελείται από μικρά pixels με αποτέλεσμα ένα στρώμα να σχηματίζεται από μικρά voxels .



Εικόνα 3: Διάγραμμα λειτουργίας DLP εκτυπωτή [17]

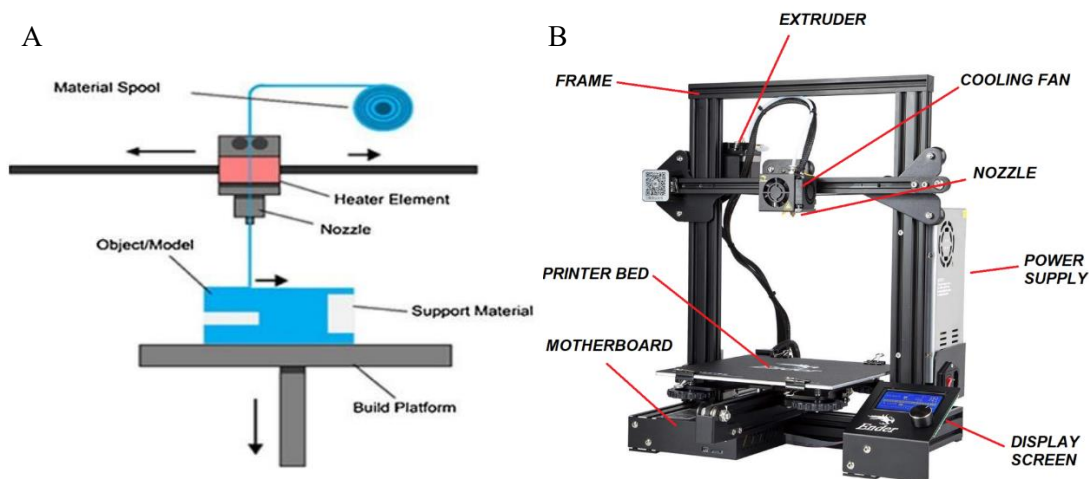
Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας εκτύπωσης είναι ανθεκτικά και έχουν εξαιρετική ανάλυση. Μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου DLP έναντι της SLA είναι το λιγότερο υλικό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή λεπτομερειών, με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος και λιγότερα απόβλητα. Παραδείγματα εκτυπωτών DLP είναι ο εκτυπωτής Envision Tec Ultra, ο εκτυπωτής MiiCraft High Resolution 3D και ο Lunavast XG2 [15].

## C. Μοντελοποίηση απόθεσης (FDM)

Η τεχνολογία Μοντελοποίησης απόθεσης (FDM) αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τον Scott Crump, ιδρυτή της Stratasys Ltd., το 1980 [15]. Άλλες εταιρείες εκτύπωσης 3D έχουν υιοθετήσει παρόμοιες τεχνολογίες αλλά με διαφορετικά ονόματα. Μια γνωστή σήμερα εταιρεία MakerBot επινόησε μια σχεδόν ίδια τεχνολογία γνωστή ως Fused Filament Fabrication (FFF). Η μέθοδος FDM χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα πτυχιακή εργασία για την εκτύπωση όλων των κομματιών του ρομποτικού χεριού.

Με την τεχνολογία FDM είναι εφικτή η εκτύπωση λειτουργικών πρωτοτύπων, μοντέλων πρωτοτύπων αλλά και τελικών προϊόντων τελικής χρήσης. Ακόμη, είναι η μόνη τεχνολογία εκτύπωσης 3D που κατασκευάζει εξαρτήματα με θερμοπλαστικά υψηλής ποιότητας και για το λόγο αυτό τα εκτυπωμένα προϊόντα έχουν εξαιρετική μηχανική, θερμική και χημική ποιότητα [15]. Η διαδικασία εκτύπωσης που ακολουθείται παρουσιάζεται στην Εικόνα 4 και είναι η εξής:

- Ύνες θερμού πλαστικού εξέρχονται από μία κεφαλή η οποία κινείται στο επίπεδο x-y. Το υλικό έρχεται σε νηματώδη μορφή σε ένα καρούλι. Το νήμα σπρώχνεται μέσω θερμαινόμενων άκρων στο στόμιο καθώς κινείται και εξωθείται.
- Η κεφαλή εναποθέτει λεπτές στρώσεις υλικού πάνω σε μία θερμαινόμενη βάση, η οποία βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από το νήμα έτσι ώστε το υλικό να στερεοποιείται γρήγορα.
- Μόλις ολοκληρωθεί η πρώτη στρώση η βάση κατέρχεται ή η κεφαλή ανέρχεται και η κεφαλή εναποθέτει την δεύτερη στρώση υλικού πάνω στην πρώτη. Για την υποστήριξη των προηγούμενων στρώσεων είναι πιθανή η εξαγωγή υλικού υποστήριξης, το οποίο αφαιρείται εύκολα μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης.
- Τέλος, η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί το προϊόν.



Εικόνα 4: (A) Διαδικασία λειτουργίας FDM εκτυπωτή [18] (B) FDM εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία

Όπως και στην μέθοδο SLA έτσι και εδώ, πριν ξεκινήσει η διαδικασία της εκτύπωσης απαραίτητη είναι η δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου στο πρόγραμμα CAD. Έπειτα, ειδικό λογισμικό υπολογίζει τον τρόπο με τον οποίο ο εξωθητής δημιουργεί το κάθε επίπεδο και η θέρμανση της βάσης και του νήματος ξεκινάει. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι το νήμα θερμαίνεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, μέχρι το σημείο τήξης του.

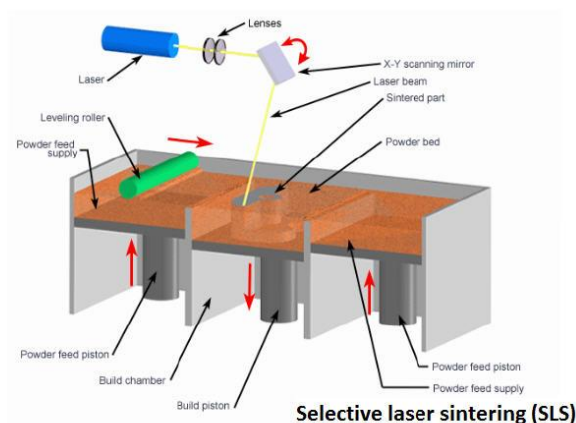
Ο χρόνος εκτύπωσης εξαρτάται από το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου που πρόκειται να εκτυπωθεί. Τα μικρά αντικείμενα μπορούν να συναρμολογηθούν σχετικά γρήγορα, ενώ μεγαλύτερα ή πιο περίπλοκα μέρη απαιτούν περισσότερο χρόνο. Σε σύγκριση με τη Στερεολιθογραφία, αυτή η τεχνική είναι πιο αργή στην επεξεργασία.

Η τεχνολογία FDM εκτύπωσης χρησιμοποιείται από μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες όπως η Hyundai και η BMW αλλά και εταιρείες τροφίμων όπως η Nestle και η Dial, διότι πρόκειται για τεχνολογία απλή στη χρήση και φιλική προς το περιβάλλον [15]. Επιπλέον, τα πιο συνηθισμένα ήδη θερμοπλαστικών που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη μέθοδο είναι τα νήματα ABS, PC και PLA. Τέλος, ορισμένα θερμοπλαστικά μπορούν ακόμη και να χρησιμοποιηθούν σε συσκευασίες τροφίμων και φαρμάκων [15].

#### D. Επιλεκτική Σύντηξη με λέιζερ (SLS)

Η Επιλεκτική Σύντηξη (Συσσωμάτωση) με λέιζερ (SLS) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί το λέιζερ ως πηγή ισχύος για το σχηματισμό στερεών τρισδιάστατων αντικειμένων. Αυτή η τεχνική αναπτύχθηκε από τον Carl Deckard, φοιτητή του Πανεπιστημίου του Τέξας, και τον καθηγητή του Joe Beaman το 1980. Αργότερα συμμετείχαν στην ίδρυση της Desk Top Manufacturing (DTM) Corp., η οποία πωλήθηκε στον μεγάλο ανταγωνιστή της 3D Systems το 2001. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η 3D Systems Inc. ανέπτυξε την Στερεολιθογραφία, η οποία κατά κάποιο τρόπο είναι παρόμοια με την SLS. Η κύρια διαφορά τους είναι η μορφή του υλικού που χρησιμοποιούν στον κάδο, καθώς η μέθοδος SLA χρησιμοποιεί υγρή ρητίνη, ενώ η SLS υγρό σε σκόνη [15]. Η διαδικασία λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνα 5):

- Λέιζερ λιώνει και στερεοποιεί διάφορα υλικά σε μορφή κόκκων.
- Κύλινδρος στρώνει μια ποσότητα υλικού σε κόκκους κατάλληλου πάχους πάνω σε μια επιφάνεια.
- Το λέιζερ εκθέτει το σχήμα της πρώτης διατομής
- Η επιφάνεια κατέρχεται και τοποθετείται σκόνη την οποία ξανά στρώνει ο κύλινδρος.
- Το λέιζερ εκθέτει την επόμενη διατομή στερεοποιώντας την πάνω στην πρώτη. Και η διαδικασία συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο.



Εικόνα 5: Διαδικασία λειτουργίας SLS εκτυπωτή [19]

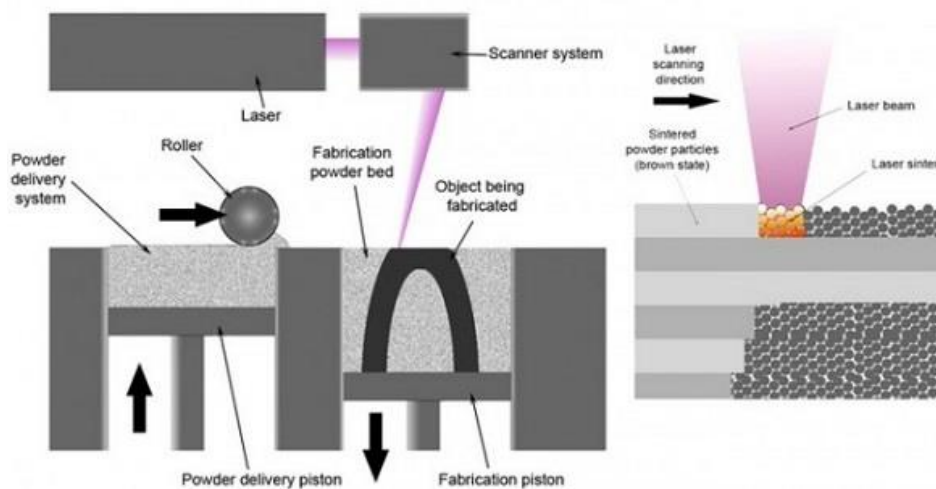
Σε αντίθεση με άλλες διαδικασίες παραγωγής πρόσθετων, όπως την Στερεολιθογραφία (SLA) και την Μοντελοποίηση Εναποθέσεων (FDM), η μέθοδος αυτή δεν χρειάζεται δομές

υποστήριξης καθώς το αντικείμενο που εκτυπώνεται περιβάλλεται συνεχώς από αδιάβροχη σκόνη, η οποία λειτουργεί ως στήριγμα του αντικειμένου.

Όπως όλες οι άλλες μέθοδοι που αναφέρονται παραπάνω, η διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία ενός αρχείου σχεδίασης στον υπολογιστή (CAD), το οποίο στη συνέχεια πρέπει να μετατραπεί σε μορφή .stl με ειδικό λογισμικό. Το υλικό εκτύπωσης μπορεί να είναι οτιδήποτε, από νάιλον, κεραμικό και γυαλί έως και μέταλλο όπως αλουμίνιο, χάλυβας ή ασήμι. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον συγκεκριμένο 3D εκτυπωτή, η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα δημοφιλής για τρισδιάστατη εκτύπωση προσαρμοσμένων προϊόντων. Τέλος, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες και δεν συνίσταται για οικιακή χρήση, διότι απαιτεί λέιζερ υψηλής ισχύος, γεγονός που καθιστά τον εκτυπωτή πολύ ακριβό [15].

### Ε. Επιλεκτική τήξη λέιζερ (SLM)

Η επιλεκτική τήξη λέιζερ (SLM) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί επίσης δεδομένα 3D CAD ως πηγή και σχηματίζει αντικείμενο 3D μέσω μιας δέσμης λέιζερ υψηλής ισχύος που συγχωνεύει και λιώνει τις μεταλλικές σκόνες μαζί. Η μέθοδος SLM ξεκίνησε σε γερμανικό ερευνητικό πρόγραμμα που πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Fraunhofer ILT το 1995 [15].

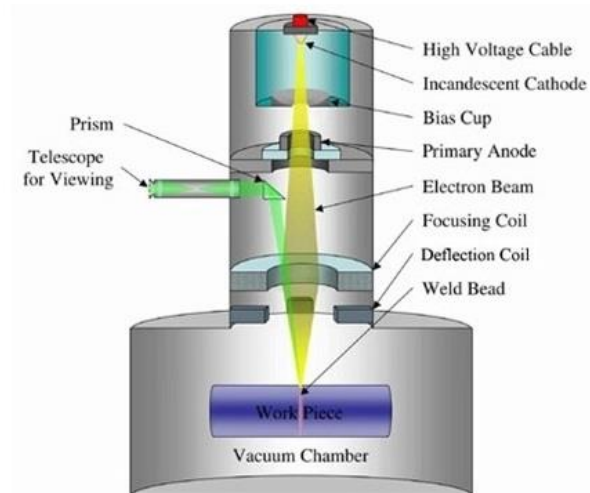


Εικόνα 6: Διαδικασία λειτουργίας SLM εκτυπωτή [15]

Η ενέργεια του λέιζερ είναι τόσο έντονη που η μεταλλική σκόνη λιώνει πλήρως και σχηματίζει ένα στερεό αντικείμενο. Τα μέταλλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτή τη μέθοδο περιλαμβάνουν ανοξείδωτο χάλυβα, τιτάνιο, χρώμιο κοβαλτίου και αλουμίνιο. Τέλος, η μέθοδος εκτύπωσης SLM εφαρμόζεται ευρέως για την εκτύπωση αντικειμένων με πολύπλοκες γεωμετρίες και δομές, όπως ελαφριών ανταλλακτικών στον τομέα της αεροδιαστημικής [15].

## F. Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM)

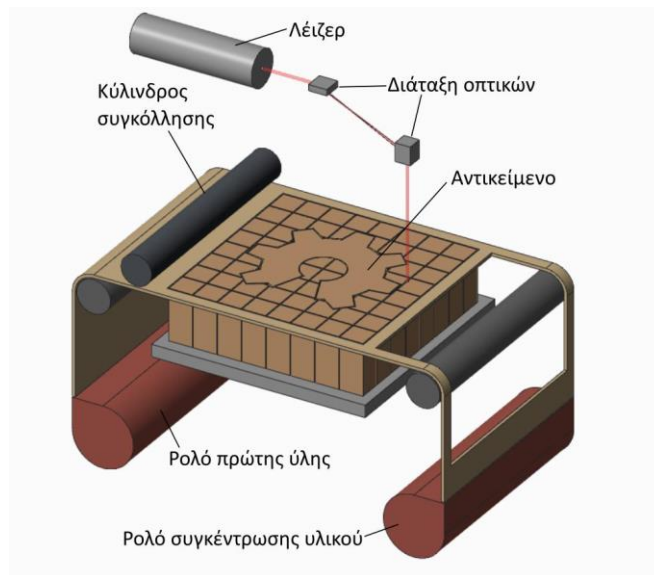
Η μέθοδος EBM είναι ένας άλλος τύπος κατασκευής προσθέτων για μεταλλικά μέρη. Αρχικά δημιουργήθηκε από την Arcam AB Inc. στις αρχές αυτού του αιώνα. Η παραγωγή των αντικειμένων γίνεται χρησιμοποιώντας υλικό μεταλλική σκόνη και σύρμα, ενώ η συγκόλληση επιτυγχάνεται με δέσμες ηλεκτρονίων. Η βασική διαφορά της, λοιπόν, με την μέθοδο SLM είναι ότι αντί για λέιζερ ως πηγή ισχύος, η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων. Οι υπόλοιπες διαδικασίες είναι παρόμοιες.



Εικόνα 7: Διαδικασία λειτουργίας EBM εκτυπωτή [20]

## G. Συγκόλληση Επάλληλων φύλλων με laser (LOM)

Η τεχνολογία LOM αναπτύχθηκε από την εταιρεία Helisys Inc. με έδρα την Καλιφόρνια το 1991-2000. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας LOM, στρώματα πλαστικού ή χαρτιού ελασματοποιούνται με τη χρήση θερμότητας και πίεσης και έπειτα κόβονται στο επιθυμητό σχήμα με laser ή λεπίδα ελεγχόμενη από υπολογιστή. Όπως όλα τα 3D εκτυπωμένα αντικείμενα, τα μοντέλα που εκτυπώνονται με τη χρήση της μεθόδου LOM ξεκινούν ως αρχεία CAD και πρέπει να μετατραπούν σε μορφές που μπορεί να αναγνωρίσει ο 3D εκτυπωτής, συνήθως STL ή 3DS. Συνοπτικά η περιγραφή της διαδικασίας 3D εκτύπωσης με τη μέθοδο LOM παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 8: Διαδικασία λειτουργίας LOM εκτυπωτή

## ΙΧ. Τρόπος προσέγγισης και μεθοδολογία για την διεκπεραίωση της εργασίας

Για την υλοποίηση της συγκριμένης εργασίας έπρεπε να ολοκληρωθούν συγκεκριμένα βήματα, σε κάθε ένα από τα οποία παρουσιάστηκαν ορισμένες δυσκολίες και ιδιαιτερότητες. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας.

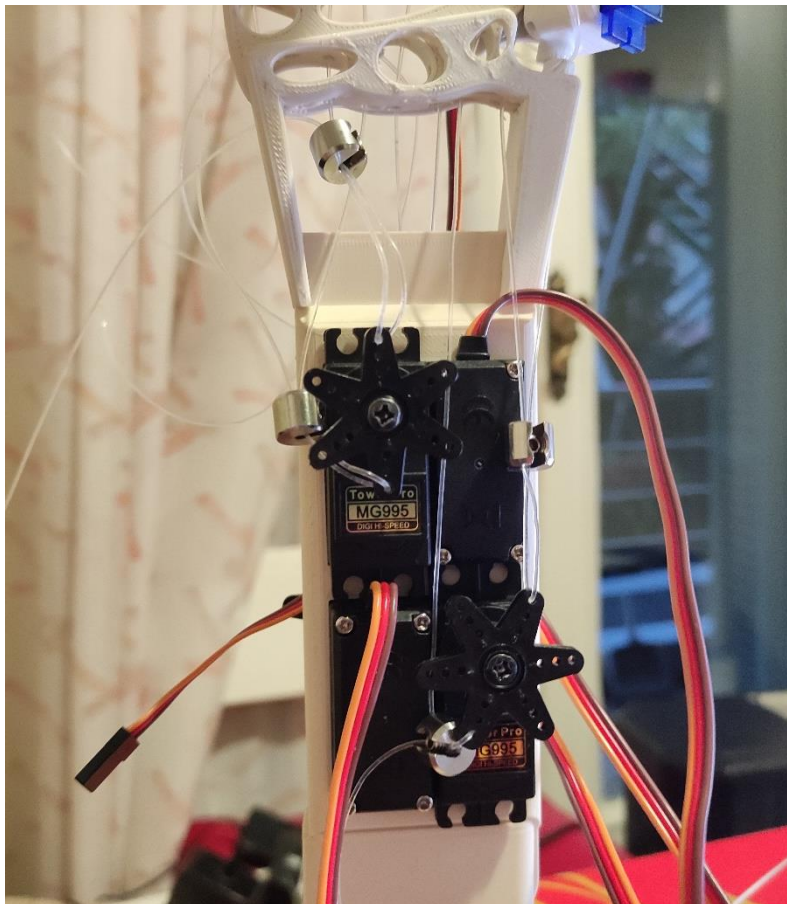
### Α. Αναζήτηση και αξιολόγηση σχεδίων CAD

Ο μηχανικός σχεδιασμός ενός ρομποτικού χεριού από την αρχή ( δημιουργία CAD και STL αρχείων) για να γίνει ορθολογικά, προϋποθέτει ένα υπόβαθρο πάνω στην κινητική που συνήθως το συναντάμε σε μηχανολόγους μηχανικούς. Για αποφυγή μιας ακόμη χρονικής επιβάρυνσης πάνω στην εργασία, επιλέχθηκε η αναζήτηση και επιλογή έτοιμων σχεδίων και τελικά η 3D εκτύπωση τους, η οποία από μόνη της είναι μια διαδικασία που έχει αρκετές παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψιν.

Όπως μπορεί κάποιος να δει με μια γρήγορη αναζήτηση, υπάρχει πληθώρα επιλογών πάνω στο συγκεκριμένο θέμα, οπότε σημαντικός είναι ο καθορισμός ορισμένων κριτηρίων για τον περιορισμό των επιλογών. Αρχικά, το ρομποτικό χέρι θα πρέπει να αποτελείται από αρθρώσεις ώστε να μπορεί να αποκτήσει μια ελαστικότητα και να μπορεί να πραγματοποιήσει τις βασικές κινήσεις ενός αληθινού χεριού. Έπειτα, η αυτοδυναμία στις κινήσεις των άκρων ήταν ένα ακόμα κριτήριο επιλογής, έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να κινήσει κάθε δάχτυλο του ρομποτικού χεριού ανεξάρτητα. Τέλος, σημαντικό είναι η κατασκευή να είναι συμπαγής, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί οποιοδήποτε ρίσκο φθοράς. Επομένως ένα ακόμα κριτήριο ήταν η επιλογή κατασκευής με ενσωματωμένους τους κινητήρες.

Με όλα τα παραπάνω σαν γνώμονα και ύστερα από εκτεταμένη αναζήτηση και μελέτη πολλών σχεδίων, η καλύτερη επιλογή και αυτή που τελικά χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του στόχου της παρούσας εργασίας ήταν το σχέδιο: <https://hackaday.io/project/102439-robot-hand-bionic-hand-prosthesis-prototype>. Στο συγκεκριμένο σχέδιο, κάθε άκρο κινείται με την βοήθεια ενός σερβοκινητήρα 9g ο οποίος είναι συνδεδεμένος πάνω σε έναν μικροεπεξεργαστή Arduino Uno. Κάθε δάκτυλο αποτελείται από τρεις διαφορετικές αρθρώσεις, και κάθε άρθρωση με την σειρά της έχει από δυο μικρές οπές στην μπροστινή και στην πίσω όψη της. Τα σχέδια αναλυτικά παρατίθενται στην ενότητα XII.

Δυο διαφορετικές πετονιές διαμετρικού πάχους 1mm έχουν περαστεί σε κάθε μια από τις τρεις αρθρώσεις. Η μια πετονιά έχει περαστεί σε κάθε μια από τις πάνω οπές και αντιστοίχως η δεύτερη στις από κάτω. Η άκρη κάθε πετονιάς έχει περαστεί στους έλικες του κινητήρα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε σε κίνηση 180 μοιρών να κλείνει το δάχτυλο και αντιστοίχως όταν επανέρχεται στην αρχική του θέση να μένει τεντωμένο. Λόγω της διαστολής και της συστολής των άκρων παρατηρήθηκε ότι μετά από εκτεταμένη χρήση του χεριού η πετονιά άρχισε να χαλαρώνει από την θέση που είχε αρχικά τοποθετηθεί. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν ειδικά τερματικά τα οποία βιδώνουν πάνω σε συγκεκριμένα σημεία και αποτρέπουν το παραπάνω φαινόμενο.



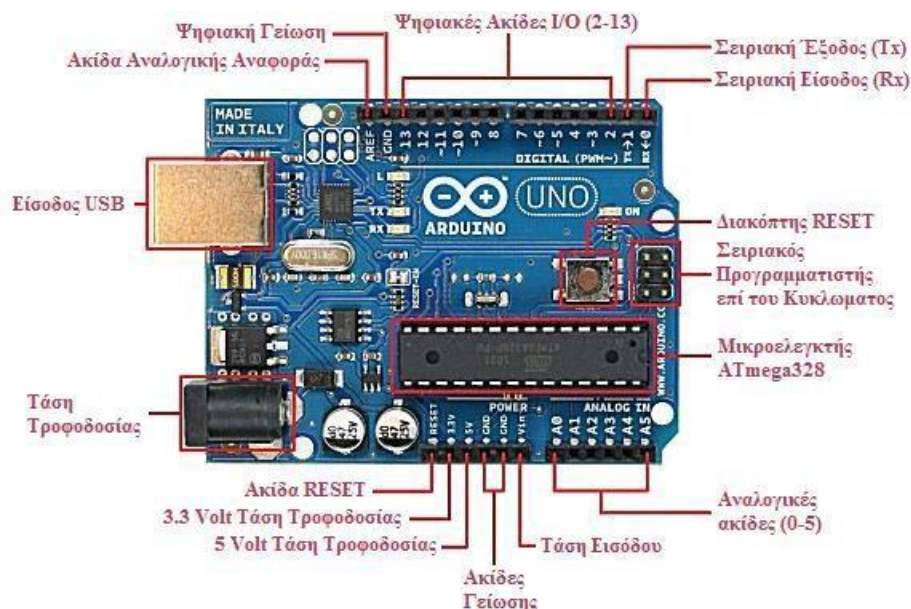
*Εικόνα 9: Ο πήχης του χεριού, αποτελεί το μέρος όπου μπήκαν οι 4 κινητήρες, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την κίνηση όλων των δαχτύλων εκτός του αντίχειρα.*



## X. Εισαγωγή στους μικροελεγκτές τύπου Arduino

Μικροελεγκτής είναι ένα προγραμματισμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο αποτελείται από επεξεργαστή, μνήμη, περιφερειακά κυκλώματα και θύρες εισόδου και εξόδου ώστε να είναι δυνατή η επικοινωνία με εξωτερικές πηγές. Η κύρια χρήση του μικροελεγκτή είναι να ελέγχει τη λειτουργία μιας μηχανής χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα που είναι αποθηκευμένο στη μνήμη ROM και μένει το ίδιο σε όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή προϋποθέτει της ύπαρξη στοιχειωδών κυκλωμάτων ή συγκεκριμένων διασυνδέσεων με έναν υπολογιστή είτε ειδικού προγραμματιστή [21].

Το Arduino είναι ένας μικροελεγκτής μονής πλακέτας, δηλαδή βασίζεται σε μια απλή μητρική πλακέτα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή, εισόδους/εξόδους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία πρωτοτύπων συσκευών. Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή στην πλατφόρμα Arduino γίνεται με την γλώσσα Wiring C που αποτελεί παραλλαγή της C++. Έτσι, ο προγραμματισμός μιας τέτοιας πλατφόρμας είναι φιλικότερος προς τον χρήστη και επιτρέπει στην γρηγορότερη ανάπτυξη εφαρμογών χωρίς να προϋποθέτει την λεπτομερή γνώση της αρχιτεκτονικής του μικροελεγκτή. Επιπλέον, οτιδήποτε είναι απαραίτητο για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή βρίσκεται πάνω στην κάρτα στην οποία είναι τοποθετημένος. Ο προγραμματισμός του γίνεται στον υπολογιστή και έπειτα ο εκτελέσιμος κώδικας μεταφορτώνεται στην πλατφόρμα μέσω της θύρας USB. Τέλος, το Arduino έχει τη δυνατότητα επαναπρογραμματισμού, καθώς οι μικροελεγκτές που φέρουν είναι εφοδιασμένοι με ένα ειδικό λογισμικό του ονομάζεται bootloader [22]. Τα κύρια μέρη από τα οποία απαρτίζεται μία πλατφόρμα Arduino Uno παρουσιάζονται στην Εικόνα 10.

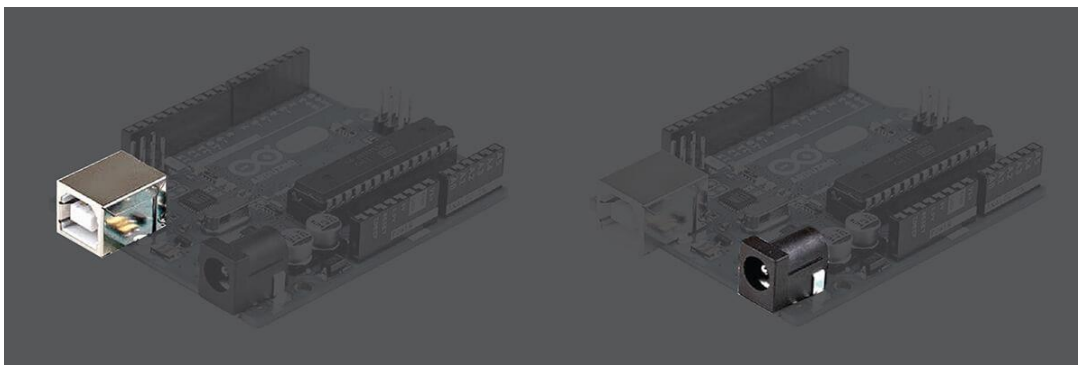


Εικόνα 10: Βασικά μέρη του Arduino Uno [23]

Τα χαρακτηριστικά που διαθέτει ένας μικροελεγκτής τύπου Arduino Uno είναι τα εξής:

- Επεξεργαστής Atmega328P 16 MHz
- 2 kB μνήμη RAM
- 32 kB μνήμη Flash
- 14 ψηφιακά και 6 αναλογικά I/O Pins
- Λειτουργία 5V
- USB θύρα επικοινωνίας
- Μέγεθος: 68.6mm x 53.3mm

Πιο αναλυτικά, η πλατφόρμα διαθέτει εξωτερική τροφοδοσία για την αυτόνομη λειτουργία της χωρίς την χρήση υπολογιστή (Εικόνα 11). Η τροφοδοσία αυτή μπορεί να προέρχεται από τροφοδοτικό, μπαταρία ή άλλο παρόμοιο στοιχείο (7-12 DC, ιδανικά 9DC). Επιπλέον, διαθέτει μία θύρα USB ώστε να είναι εφικτή η σύνδεση της πλακέτας με τον υπολογιστή για την μεταφόρτωση του κώδικα αλλά και την ταυτόχρονη τροφοδοσία της (Εικόνα 11). Η πλατφόρμα επίσης διαθέτει αναλογικές και ψηφιακές ακίδες (ακροδέκτες) στους οποίους είναι δυνατή η σύνδεση αισθητήρων, διακοπών, μοτερ κλπ. Οι αναλογικοί αισθητήρες πραγματοποιούν ανάγνωση σημάτων 0 έως 5V με δυνατότητα αποτύπωσης σε 1024 στάθμες, ενώ οι ψηφιακές εισοδοι και έξοδοι (digital I/O) αναγνωρίζουν τις στάθμες 0 ή 5V. Εν συνεχεία, υπάρχουν επίσης οι ακίδες τροφοδοσίας (Power headers) οι οποίες αποτελούνται από τους ακροδέκτες γείωσης, εισόδου τάσεις 7-12V και ακροδέκτες που δίνουν καθαρά 5 και 3.3 V. Τέλος, η πλατφόρμα Arduino Uno διαθέτει και κουμπί Reset για την επανεκκίνηση του προγράμματος [23].



Εικόνα 11: Είσοδος USB (αριστερά) και Τάση τροφοδοσίας (δεξιά)

## XI. Περιγραφή των υλικών, των μηχανών και του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν

Για την υλοποίηση της κατασκευής του ρομποτικού χεριού χρειάστηκαν πολλά διαφορετικά εξαρτήματα και μηχανήματα. Πιο συγκεκριμένα για την 3D εκτύπωση του χεριού χρησιμοποιήθηκε ο 3D εκτυπωτής Wanhao Duplicator 6 και νήμα υλικού PLA, για τον προγραμματισμό του χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Arduino IDE με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού C++ και τέλος για την πραγματοποίηση των κινήσεων του χεριού χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα Arduino Uno, πλακέτα δοκιμών (breadboard), σερβοκινητήρες,

διακόπτες (pushbuttons), ποτενσιόμετρα, αντιστάσεις, leds και καλώδια. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

*Wanhao Duplicator 6*: Είναι ο 3D εκτυπωτής που βρίσκεται στο εργαστήριο του τμήματος και χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την δημιουργία των περισσότερων κομματιών της εργασίας. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι βασισμένο πάνω στον Zortrax, M200. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α:

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά 3D εκτυπωτή *Wanhao Duplicator 6*

Όγκος: 20 x 20 x 17.5 cm
<b><i>Layer resolution</i></b>
Ultra high 20 micron
High 60 micron
Medium 100 micron
Low 200 micron
<b><i>Position precision</i></b>
X 12,5 micron
Y 12,5 micron
Z 5 micron
Filament diameter 1.75mm (generally known as 1.75mm filament)
Nozzle diameter 0.4 mm
Print speed 30 mm/1 – 300 mm/s
Travel speed 30 mm/1 – 350 mm/s
<b><i>Software</i></b>
Software package Cura – WANHAO EDITION
File types STL / OBJ / DAE / AMF
Supports Windows (XP 32 bit/7+)
Ubuntu Linux (12.04+)

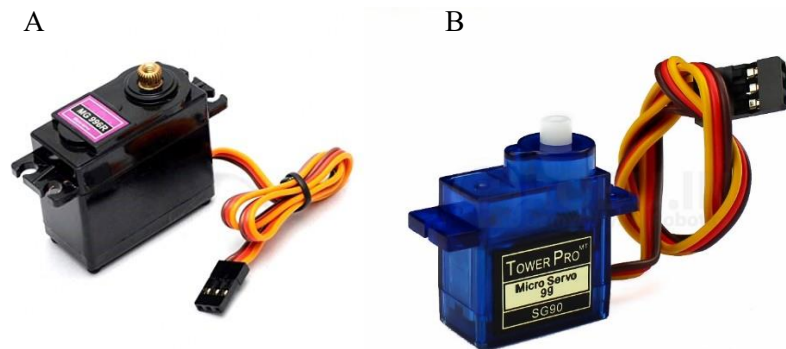
Mac OS X (10.6 64bit +)
<b>Electrical</b>
AC INPUT 100 – 240 V,
~4 AMPS,
50 – 60 HZ
221 watt max.
Power RequirementsC onnectivity
24 V DC @ 9.2 AMPS
Stand-alone printing from SD-card
USB (firmware)
Frame Dimension
X 34.8 cm
Y 26.4 cm
Z 43.0 cm
With all parts attached and the max height filament guide tube
X 36.0 cm
Y 44.0cm
Z 48.0 cm



Τα κομμάτια του χεριού κατασκευάστηκαν από το υλικό PLA. Το νήμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν διαμέτρου 1.75mm και το υλικό προτιμήθηκε έναντι των άλλων που έχουν αναφερθεί διότι πρόκειται για ένα οικονομικό υλικό εύκολο για οικιακή χρήση (χαμηλό σημείο τήξης) καθώς επίσης και φιλικό προς το περιβάλλον.

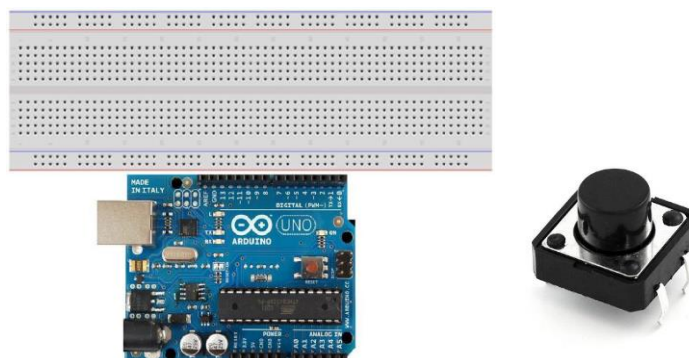
Οι σερβοκινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- 4 Κινητήρες Servo MG996R για την κίνηση των δακτύλων εκτός του αντίχειρα. Οι συγκεκριμένοι προσφέρουν μεγάλη ροπή (11 kg/cm) και όπως και οι υπόλοιποι rc servo κινητήρες, περιστρέφονται από 0 έως 180 μοίρες με βάση τον κύκλο λειτουργίας του κύματος PWM που παρέχεται στο pin σήματος.
- 2 Κινητήρες Servo SG90, είναι κινητήρες με λιγότερο βάρος από τους MG996R και προφανώς μικρότερη ροπή (1.3 kg/cm), χρησιμοποιήθηκαν για την κίνηση του αντίχειρα.



Εικόνα 12: Κινητήρες Servo MG996R (A) και Servo SG90 (B)




















Η πλακέτα Arduino Uno είναι από τους πιο διαδεδομένους microcontrollers, όπως ήδη αναφέρθηκε και περιγράφηκε η λειτουργία της, και χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό της κατασκευής. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν επίσης δύο breadboards όπου τοποθετήθηκαν οι διακόπτες pushbuttons, οι αντιστάσεις, τα φωτάκια led και τα ποτενσιόμετρα. Χρησιμοποιήθηκαν 2 κουμπιά, για την εναλλαγή από Demo και σε Manual mode.

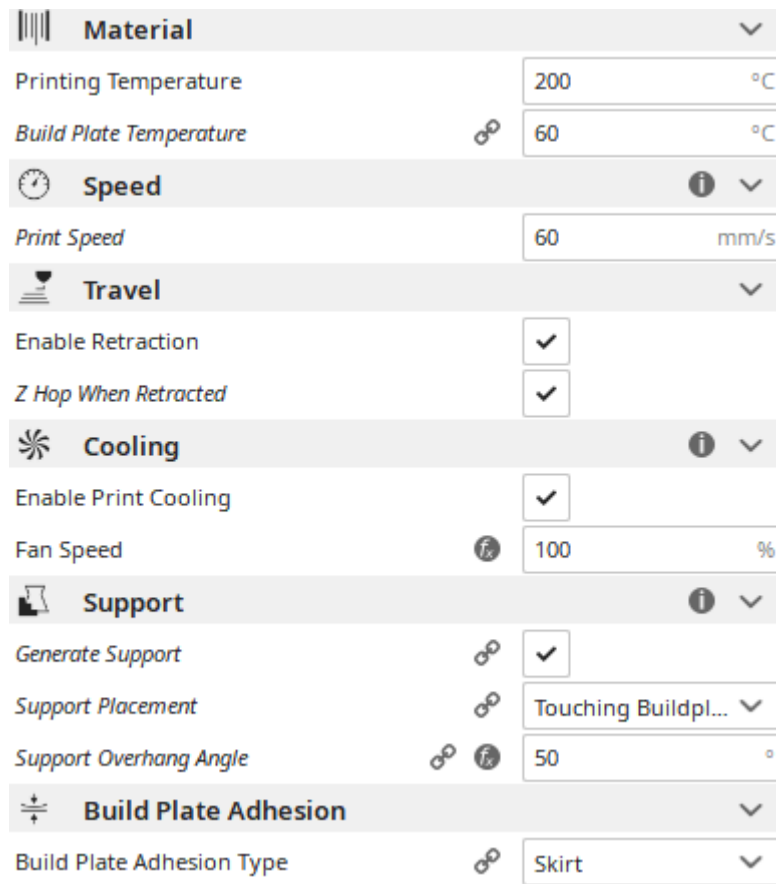


Εικόνα 13: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τον προγραμματισμό της κίνησης του χεριού

## A. Παραμετροποίηση των επιλογών στο Cura

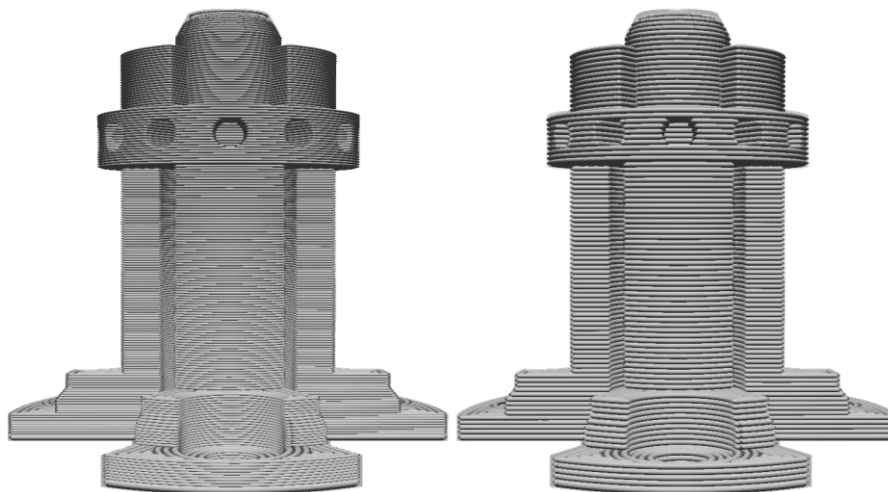
Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, η 3D εκτύπωση δεν είναι μια απλή τυποποιημένη διαδικασία, για τον λόγο αυτό το Cura δίνει μια πληθώρα επιλογών έτσι ώστε να δημιουργηθεί το προφίλ της εκτύπωσης που είναι επιθυμητό ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Παρακάτω εξηγείται πως λειτουργεί κάθε μια από τις επιλογές έτσι ώστε να γίνει καλύτερα αντιληπτό για ποιον λόγο επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες παράμετροι για την εκτύπωση των κομματιών.

 <b>Quality</b> 	
Layer Height	<input type="text" value="0.16"/> mm
 <b>Shell</b>  	
Wall Thickness	<input type="text" value="1.2"/> mm
Wall Line Count	<input type="text" value="3"/>
Top/Bottom Thickness	<input type="text" value="0.8"/> mm
Top Thickness	<input type="text" value="0.8"/> mm
Top Layers	<input type="text" value="5"/>
Bottom Thickness	<input type="text" value="0.8"/> mm
Bottom Layers	<input type="text" value="5"/>
Horizontal Expansion	<input type="text" value="0"/> mm
 <b>Infill</b>  	
Infill Density	<input type="text" value="10"/> %
Infill Pattern	<input type="text" value="Zig Zag"/> 
 <b>Material</b> 	
Printing Temperature	<input type="text" value="200"/> °C
Build Plate Temperature	<input type="text" value="60"/> °C
 <b>Speed</b>  	
Print Speed	<input type="text" value="60"/> mm/s
 <b>Travel</b> 	
Enable Retraction	<input checked="" type="checkbox"/>
Z Hop When Retracted	<input checked="" type="checkbox"/>
 <b>Cooling</b>  	
Enable Print Cooling	<input checked="" type="checkbox"/>
Fan Speed	<input type="text" value="100"/> %



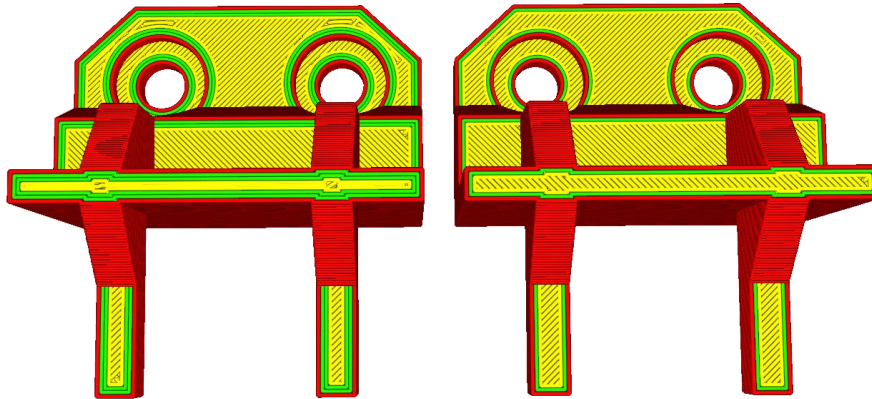
Εικόνα 14: Παράμετροι που επιλέχθηκαν στο πρόγραμμα Cura

**Layer height:** Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως ένας 3D εκτυπωτής εκτυπώνει σε στρώσεις υλικού. Όσο μεγαλύτερη απόσταση έχει η μια στρώση από την άλλη τόσο πιο γρήγορα ολοκληρώνεται η εκτύπωση, αλλά μειώνεται η ανάλυση και η ακρίβεια από το αρχικό σχέδιο (Εικόνα 15).



Εικόνα 15: Απεικόνιση εκτυπωμένων αντικειμένων με διαφορετικά ύψη στρώματος (layer height). Το αριστερό κομμάτι έχει μεγαλύτερο layer height από το δεξί. Μπορεί να γίνει αντιληπτή η διαφορά στην ανάλυση των δύο κομματιών.

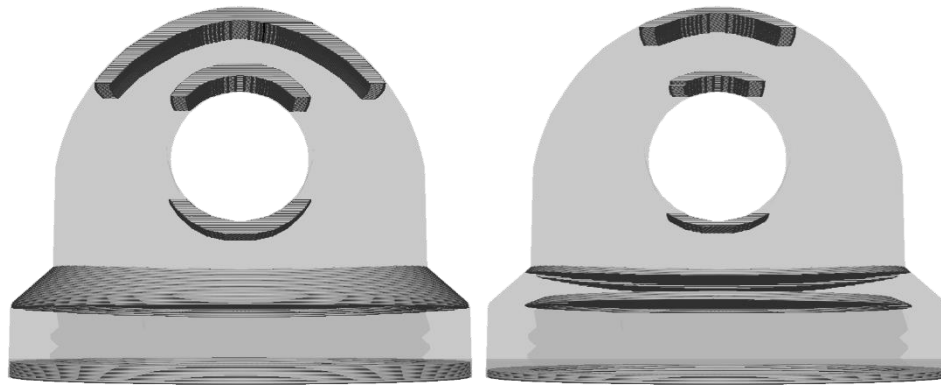
**Wall thickness και Wall line:** Αυτή η ρύθμιση προσαρμόζει το πάχος των τοιχωμάτων του μοντέλου. Το Ultimaker Cura στρογγυλοποιεί το πάχος του τοιχώματος πολλαπλασιάζοντας επί το πλάτος της γραμμής. Γενικά, αρκεί ένα wall thickness δύο ή τρεις φορές το πλάτος της γραμμής. Μια υψηλότερη τιμή θα δημιουργήσει ένα πιο ανθεκτικό μοντέλο και μειώνει την πιθανότητα διαρροών, ενώ μια χαμηλότερη τιμή μπορεί να μειώσει σημαντικά το χρόνο εκτύπωσης και το νήμα που θα χρησιμοποιηθεί.



*Εικόνα 16: Απεικόνιση εκτυπωμένων αντικειμένων με διαφορετικά πάχη τοιχώματος. Το αριστερό κομμάτι έχει μεγαλύτερο πάχος (τρία τοιχώματα) από το δεξί (δύο τοιχώματα). Μπορεί να γίνει αντιληπτή η διαφορά στην ανάλυση των δύο κομματιών.*

**Top/Bottom thickness:** Με το πάνω (top) και το κάτω (bottom) πάχος (thickness) μπορεί να οριστεί το πάχος των αρχικών και των τελικών στρώσεων της εκτύπωσης. Μια υψηλότερη τιμή διασφαλίζει ότι όλα τα κενά στο πάνω και στο κάτω στρώμα κλείνουν εντελώς. Ωστόσο, αυτό μπορεί επίσης να αυξήσει το χρόνο εκτύπωσης και την ποσότητα του νήματος που χρησιμοποιείται. Συνιστάται να χρησιμοποιείτε πάντα πολλαπλάσιο του ύψους του στρώματος για το πάχος του πάνω και του κάτω. Αυτό σημαίνει, για παράδειγμα, ότι με ύψος στρώματος 0.15 mm, είναι καλύτερο να ρυθμιστεί το πάχος πάνω / κάτω σε 0.6 mm αντί 0.7 mm.



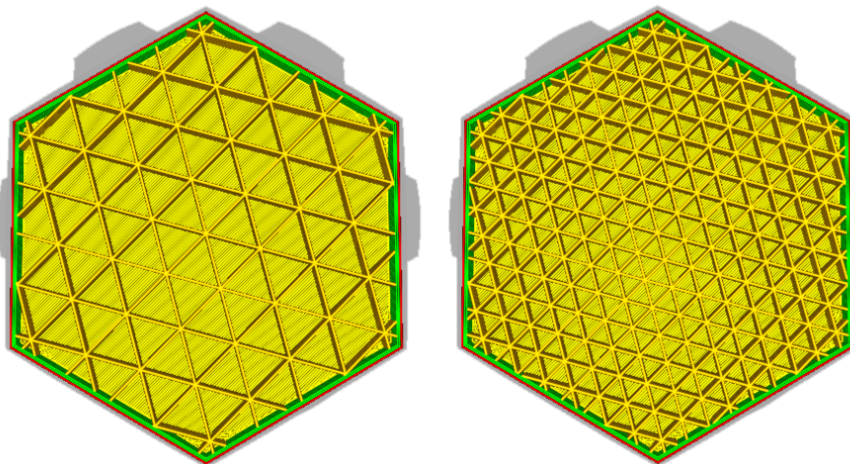


Εικόνα 17: Απεικόνιση εκτυπωμένων αντικειμένων με διαφορετικά πάχη. Το αριστερό κομμάτι έχει top/bottom thickness 1.4mm ενώ το δεξιά 0.7mm

**Ξεχωριστό Top/Bottom thickness:** Μπορεί επίσης να οριστεί ξεχωριστά το πάχος των άνω και κάτω στρώσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την κορυφή καθώς μπορεί να χρειαστούν μερικές στρώσεις σε άλλες περιπτώσεις για να κλείσει σωστά το μοντέλο και να αποτραπεί ένα φαινόμενο που είναι γνωστό και ως "pillowing". Χρησιμοποιώντας λιγότερα επίπεδα στο κάτω μέρος εξοικονομείται υλικό και χρόνο εκτύπωσης.

**Αριθμός Top /Bottom στρώσεων:** Αντί να οριστεί ύψος σε χιλιοστά για τα πάνω ή κάτω στρώματα, μπορεί να οριστεί ένας συγκεκριμένος αριθμός επιπέδων. Το ύψος σε χιλιοστά θα υπολογιστεί αυτόματα ανάλογα με το ύψος στρώματος που έχει οριστεί. Για παράδειγμα: Αριθμός πάνω στρώσεων 12 \* 0,1 mm ύψος στρώσης = πάχος στρώσης 1,2 mm

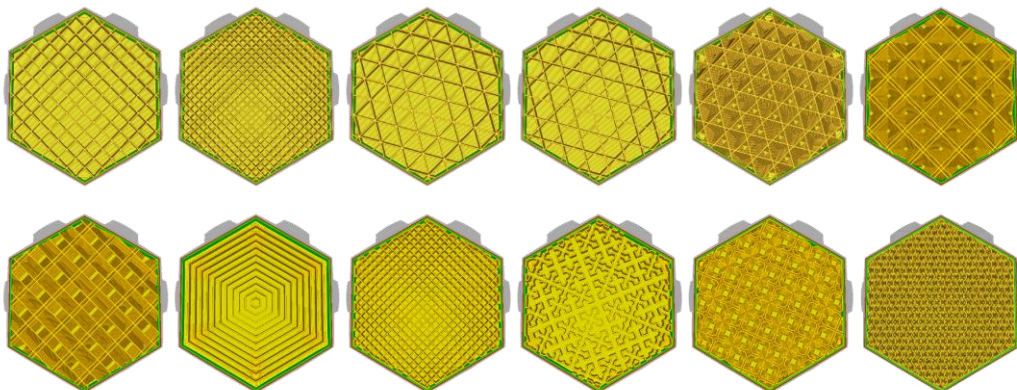
**Infill Density:** Το Infill Density καθορίζει την ποσότητα του πλαστικού που χρησιμοποιείται στο εσωτερικό της εκτύπωσης. Μεγαλύτερο Infill Density σημαίνει ότι υπάρχει περισσότερο πλαστικό στο εσωτερικό της εκτύπωσης, που οδηγεί σε ισχυρότερο αντικείμενο.



Εικόνα 18: Απεικόνιση εκτυπωμένων αντικειμένων με διαφορετικές εσωτερικές πυκνότητες. Το δεξιά μοντέλο έχει μεγαλύτερο infill density από το αριστερά

**Infill pattern:** Μπορεί να αλλάχθει το μοτίβο με το οποίο γεμίζεται το μοντέλο, κάτι που σε συγκεκριμένες περιπτώσεις είναι ωφέλιμο.

- Strong 2D Infills: Γεμίσματα για απλές καθημερινές εκτυπώσεις.
- Quick 2D Infills: Γεμίσματα γρήγορα, που χρησιμοποιούν λιγότερο νήμα και ολοκληρώνονται σε μικρότερο χρονικό διάστημα αλλά προσφέρουν αδύναμα μοντέλα.
- 3D Infills: Χρησιμοποιείται για να κάνει το αντικείμενο ανθεκτικό προς όλες τους άξονες
- 3D concentric infills: Αυτή είναι και η μέθοδος που θα επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη κατασκευή και χρησιμοποιείται για εύκαμπτα έλεγα. Τα τρισδιάστατα γεμίσματα διατίθενται στις ακόλουθες επιλογές μοτίβου:
  - Grid (Πλέγμα): Strong 2D Infill
  - Lines (Γραμμές): Quick 2D Infill
  - Triangle (Τρίγωνα): Strong 2D Infill
  - Tri-hexagon: Strong 2D Infill
  - Cubic (Κύβοι): Strong 3D Infill
  - Cubic (subdivision): Strong 3D Infill (αυτό εξοικονομεί περισσότερο νήμα από το cubic)
  - Octet: Strong 3D Infill
  - Quarter Cubic: Strong 3D Infill
  - Concentric (Ομόκεντρα): Ευέλικτο 3D Infill
  - Zig-zag: Ένα γεμάτο πλέγμα που εκτυπώνει συνεχώς σε μια διαγώνια κατεύθυνση
  - Cross (Σταυρός): Ευέλικτο 3D Infill



Εικόνα 19: Διάφορα μοτίβα γεμίματος

**Printing temperature:** Αυτό αναφέρεται στη θερμοκρασία του ακροφυσίου κατά την εκτύπωση, συμπεριλαμβανομένου του προσαρμοσμένου ρυθμού εξώθησης. Κάθε προφίλ εκτύπωσης έχει μια ελαφρώς διαφορετική θερμοκρασία εκτύπωσης για να δημιουργήσει το

καλύτερο αποτέλεσμα εκτύπωσης. Για το υλικό PLA που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η θερμοκρασία ορίστηκε 200 °C.

**Build plate temperature:** Αυτή η ρύθμιση καθορίζει τη θερμοκρασία του τραπεζιού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης. Κάθε υλικό έχει μια ιδανική θερμοκρασία κατασκευής, η οποία ορίζεται εδώ. Κατά την εκτύπωση με δύο διαφορετικά υλικά, η θερμοκρασία θα είναι ο μέσος όρος των δύο. Η αλλαγή αυτής της τιμής είναι ασυνήθιστη. Για το υλικό PLA που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η θερμοκρασία ορίστηκε 60 °C.

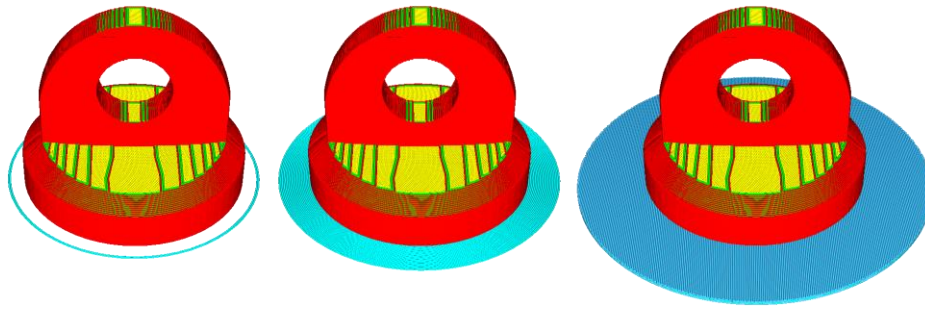
**Print Speed:** Η ταχύτητα εκτύπωσης καθορίζει την ταχύτητα (σε mm / s) με την οποία κινείται η κεφαλή εκτύπωσης κατά την εκτύπωση.

**General support:** Ορισμένα μοντέλα έχουν προεξοχές, γεγονός που σημαίνει ότι τα τμήματα του μοντέλου βρίσκονται στον αέρα όταν θα εκτυπωθούν. Σε αυτήν την περίπτωση, πρέπει να εκτυπωθεί μια δομή στήριξης κάτω από το μοντέλο για να αποτρέψει την πτώση του πλαστικού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ενεργοποιώντας το General support

**Support Placement:** Αυτή η ρύθμιση καθορίζει πού εκτυπώνεται η δομή στήριξης. Περιέχει τις ακόλουθες επιλογές:

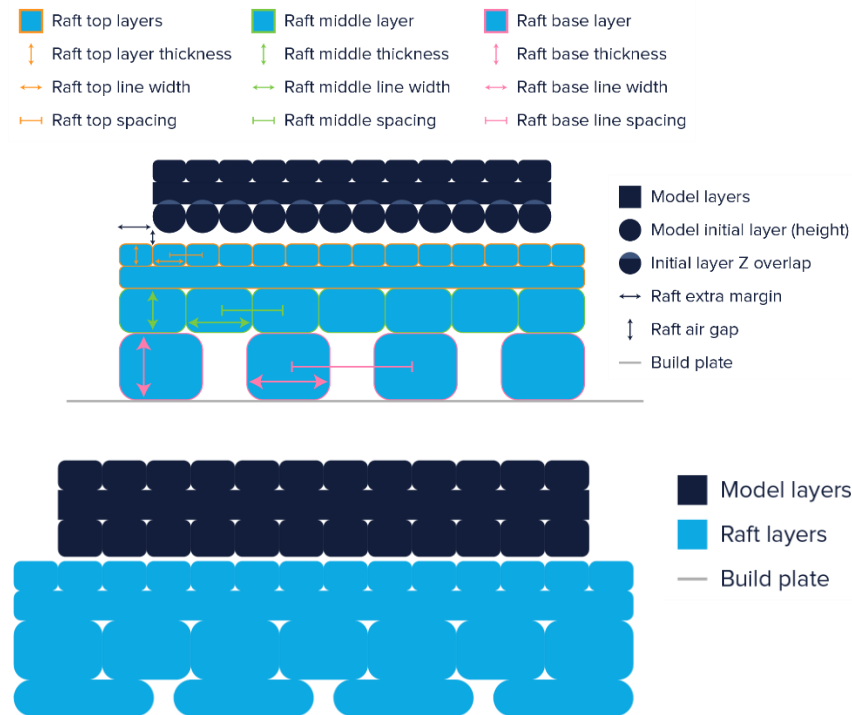
- Touching build plate: Το υλικό υποστήριξης εκτυπώνεται μόνο από την πλάκα κατασκευής.
- Everywhere: Το υλικό υποστήριξης εκτυπώνεται κάτω από κάθε τμήμα που χρειάζεται υποστήριξη, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί επίσης να τοποθετηθεί πάνω ή μέσα σε ένα μοντέλο.

**Build plate adhesion ρυθμίσεις:** Αρκετές φορές μένουν υπολείμματα από προηγούμενες εκτυπώσεις στο ακροφύσιο του εκτυπωτή. Για το λόγο αυτό, για την αποφυγή τέτοιου είδους προβλημάτων η συγκεκριμένη ρύθμιση είναι ιδιαίτερα σημαντική. Λίγο πριν ξεκινήσει να εκτυπώνεται το μοντέλο το ακροφύσιο κινείται με έναν συγκεκριμένο τρόπο για να καθαρίσει. Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη build plate adhesion: Skirt, Brim και Raft.



Εικόνα 20: Απεικόνιση τριών μοντέλων με διαφορετικές Build plate adhesion ρυθμίσεις. Από τα αριστερά προς τα δεξιά, skirt, brim και raft.

- **Brim:** Το Brim προσθέτει μια επίπεδη επιφάνεια ενός στρώματος γύρω από τη βάση του μοντέλου για την αποφυγή στρέβλωσης. Συνδέεται με το μοντέλο και κάνει την κάτω επιφάνεια μεγαλύτερη, αυτό αυξάνει την πρόσφυση στην πλάκα κατασκευής και, σε περίπτωση στρέβλωσης, οι γωνίες του μοντέλου είναι λιγότερο πιθανό να κυρτωθούν λόγω του brim που συνδέεται με αυτό. Τα υλικά που έχουν υψηλή πιθανότητα συρρίκνωσης (π.χ. ABS) μπορούν να επωφεληθούν από τη χρήση του brim. Μοντέλα που έχουν πολύ μεγάλη βάση ή πολύ λεπτά μέρη στο κάτω μέρος θα κολλήσουν επίσης καλύτερα στην πλάκα κατασκευής. Υπάρχουν πολλές διαθέσιμες επιλογές για τη ρύθμιση του brim:
  - Ελάχιστο μήκος Brim: Το μήκος σε χιλιοστά εδώ είναι η ποσότητα του νήματος που εξωθείται, ανεξάρτητα από τις άλλες ρυθμίσεις του brim.
  - Πλάτος Brim: Αυτή η ρύθμιση προσαρμόζει το πλάτος του brim σε χιλιοστά
  - Πλήθος γραμμών γραμμής: Αυτή η ρύθμιση παρακάμπει το πλάτος χείλους, ορίζοντας το πλάτος με τον αριθμό των τυπωμένων γραμμών
  - Brim μόνο στο εξωτερικό: Αυτή η ρύθμιση διασφαλίζει ότι τα μοντέλα με τρύπες στο αρχικό στρώμα, όπως ένα σχήμα ντόνατ, έχουν μόνο brim στο εξωτερικό του μοντέλου
- **Raft:** Με την χρήση του raft προστίθεται ένα παχύ πλέγμα μεταξύ του μοντέλου και της πλάκας κατασκευής. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο όταν η κάτω επιφάνεια ενός μοντέλου δεν είναι εντελώς επίπεδη ή έχει μικρή πρόσφυση στην πλάκα κατασκευής. Το Raft εξασφαλίζει ότι το μοντέλο θα κολλήσει καλύτερα στην πλάκα κατασκευής. Οι επιλογές για την ορθή χρήση raft είναι πάρα πολλές. Το raft χωρίζεται σε τρία ξεχωριστά μέρη: άνω στρώματα, μεσαία στρώματα και στρώματα βάσης. Η παρακάτω εικόνα εξηγεί τις ρυθμίσεις του raft που είναι διαθέσιμες



Εικόνα 21: Οι ρυθμίσεις του Raft όπως εμφανίζονται στο πρόγραμμα Cura (πάνω) και ένα εκτυπωμένο αντικείμενο με αυτή τη ρύθμιση (κάτω)

- Skirt: Το skirt είναι μια γραμμή που τυπώνεται γύρω από το αντικείμενο στο πρώτο στρώμα, αλλά δεν είναι συνδεδεμένη μαζί του. Αυτό βοηθά στην ενεργοποίηση του ακροφυσίου και μπορεί να είναι ένας επιπλέον έλεγχος για την ισορροπία της τράπεζας πριν ξεκινήσει η εκτύπωση. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε αυτή ρύθμιση, διότι ήταν αρκετή για το συγκεκριμένο μοντέλο που εκτυπώθηκε και δεν προκάλεσε κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα κατά την κατασκευή.

## XII. Περιγραφή της πηγής, της μηχανολογικής σχεδίασης και των κομματιών του μηχανικού χεριού που επιλέχθηκαν

Η κατασκευή του ρομποτικού χεριού είχε ως πρωταρχικό στόχο οι κινήσεις που θα πραγματοποιούνται να είναι όσο το δυνατό πιο ρεαλιστικές, και να δίνουν στον χρήστη την δυνατότητα να μπορεί να ελέγχει κάθε άκρο ξεχωριστά όπως ακριβώς θα μπορούσε να κάνει με το δικό του χέρι. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε και στους δυο εκτυπωτές έπειτα από αρκετή έρευνα για την επιλογή του ήταν νήμα PLA μιας και αποτελεί την πιο αξιόπιστη και σε χαμηλό κόστος λύση. Κάθε δάκτυλο αποτελείται από τρία διαφορετικά κομμάτια, πράγμα το οποίο δίνει μια ελαστικότητα έτσι ώστε να μπορούν να πραγματοποιούν διαφορετικού είδους γωνίες κλίσης, και από μια ειδικά σχεδιασμένη άρθρωση για να διασφαλιστεί η σταθερότητα του δαχτύλου στην παλάμη.

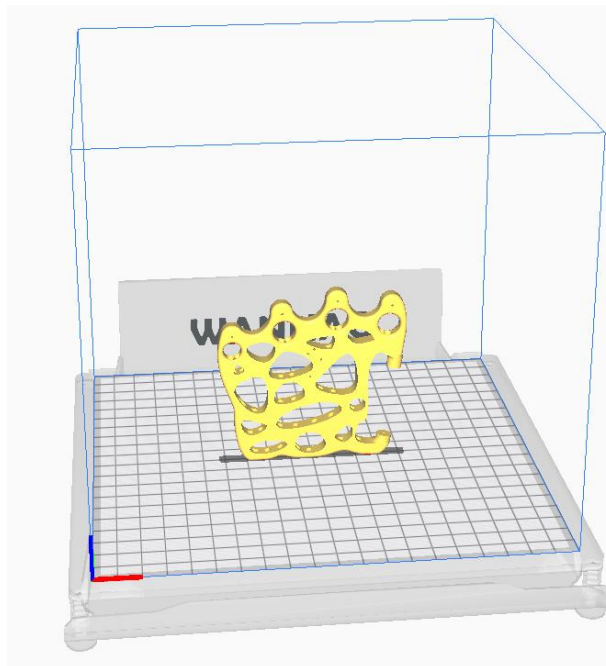
Σύμφωνα με τα παραπάνω οι παράγοντες που λήφθηκαν σοβαρά υπόψιν για την υλοποίηση του ρομποτικού χεριού ήταν:

- Ύπαρξη αρθρώσεων στα δάκτυλα (με άξονες).
- Η στιβαρότητα και η ανθεκτικότητά της κατασκευής.
- Το βάρος ολόκληρου του σκελετού ώστε να είναι ελαφρύ για να μην επιβαρύνεται η κίνηση των σερβοκινητήρων.

Τα σχέδια που πληρούσαν όλα τα κριτήρια και βασίστηκε αυτή η πτυχιακή πάνω σε αυτά βρίσκονται στην ιστοσελίδα: <https://hackaday.io/project/102439-robot-hand-bionic-hand-prosthesis-prototype>, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των σχεδίων και της διαδικασίας 3D εκτύπωσης του χεριού.

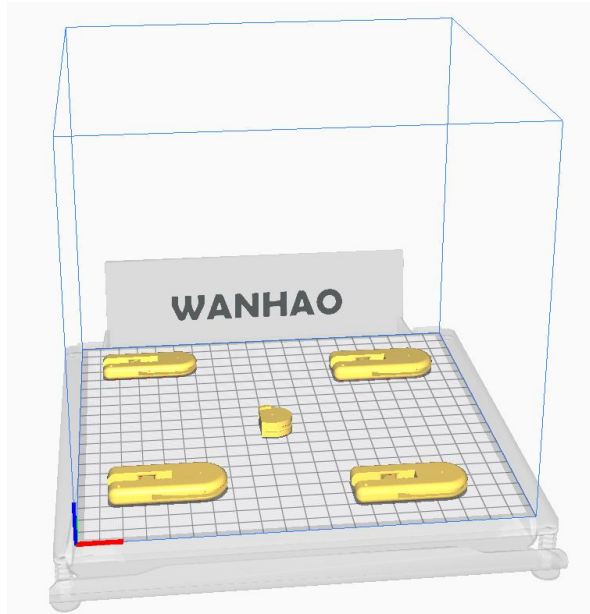
#### A. Σχέδια κατασκευής

Παρακάτω ακολουθούν μερικά στιγμιότυπα από τα σχέδια της κατασκευής του χεριού με την βοήθεια του open-source προγράμματος για 3D εκτυπωτές, Cura. Ένα κομβικής σημασίας κομμάτι και αρκετά δύσκολο ως προς την εκτύπωση του λόγω της ιδιόμορφης γεωμετρίας του, αποτέλεσε η παλάμη του ρομποτικού χεριού, το οποίο είναι η βάση όλων των δαχτύλων. Στις τέσσερις πάνω εξοχές τοποθετήθηκαν οι κλειδώσεις των δαχτύλων, εκτός του αντίχειρα ο οποίος τοποθετήθηκε στα δεξιά, όπου διακρίνεται μια εσοχή, λόγω της διαφορετικής κινησιολογίας από τα υπόλοιπα δάκτυλα. Οι τρύπες που παρατηρούνται σε διάφορα σημεία του κομματιού δεν είναι τυχαία τοποθετημένες. Από εκεί μέσα περνάνε τα νήματα από κάθε δάκτυλο έτσι ώστε να είναι πιο διακριτά όταν θα συνδεθούν στους σερβοκινητήρες.



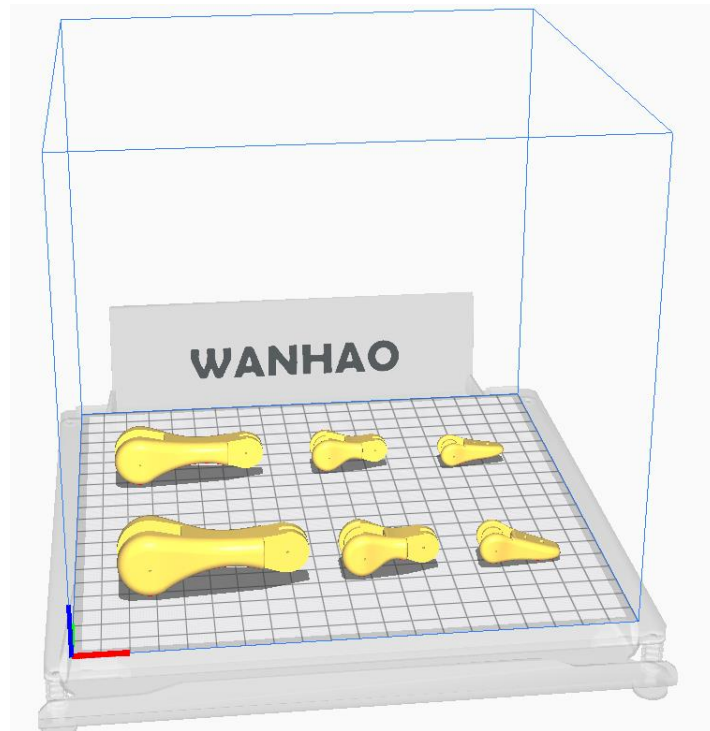
Εικόνα 22: 3D Απεικόνιση της παλάμης του ρομποτικού χεριού στο πρόγραμμα Cura

Ακολουθούν οι κλειδώσεις των δαχτύλων που ενώνονται με την παλάμη. Ανάλογα με το δάχτυλο, κάθε κλείδωση έχει και το αντίστοιχο μέγεθος, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 23. Το μικρό αυλάκι που σχηματίζεται στις κορυφές των κλειδώσεων επιτρέπει την ομαλή συστολή και διαστολή του νήματος με όσο των δυνατών λιγότερες τριβές. Στη βάση των κλειδώσεων υπάρχουν δυο μικρές οπές διαμετρικά αντίθετες έτσι ώστε να περαστεί από την μια το νήμα που θα τραβάει το δάχτυλο προς τα πάνω και από την άλλη να περαστεί αυτό που θα το σφίγγει στη παλάμη. Επίσης υπάρχει μια ακόμα μικρή οπή εγκάρσια τοποθετημένη στο αυλάκι, έτσι ώστε να περαστεί ένα μικρός άξονας που θα κρατάει την κλείδωση σταθερή στην παλάμη.



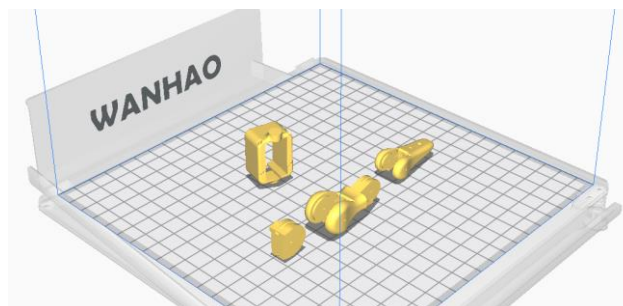
*Εικόνα 23: 3D Απεικόνιση των κλειδώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την ένωση των δαχτύλων με την παλάμη. Τα πίσω κομμάτια αντιστοιχούν στις κλειδώσει του μικρού δακτύλου (αριστερά) και του παράμεσου (δεξιά), ενώ τα μπροστά αντιστοιχούν στις κλειδώσεις του μέσου (αριστερά) και του δείκτη (δεξιά). Το κομμάτι που είναι τοποθετημένο στη μέση του επιπέδου αντιστοιχεί στην κλείδωση του αντίχειρα.*

Κάθε δάχτυλο χωρίζεται σε τρία κομμάτια όπως φαίνεται και στην Εικόνα 24. Οι αρθρώσεις έχουν δυο διαφορετικές οπές όπου περνάνε από μέσα τα νήματα από το μικρότερο στο μεγαλύτερο και καταλήγουν στις κλειδώσεις και αυτές με την σειρά τους στην παλάμη του χεριού. Οι μικρές οπές στα πλαϊνά των τριών κομματιών διευκολύνουν στην καλύτερη στήριξη των κομματιών μεταξύ τους. Για να ενωθούν τα κομμάτια, από εκεί περνάει ένας άξονας μικρής διαμέτρου, έτσι ώστε να είναι πιο συμπαγής η κατασκευή.



Εικόνα 24: 3D Απεικόνιση των τριών κομματιών από τα οποία αποτελείται κάθε δάκτυλο. Στην πίσω μεριά απεικονίζεται στο μικρό δάκτυλο, ενώ στην μπροστινή ο δείκτης.

Ο αντίχειρας κινείται με διαφορετικό τρόπο από τα υπόλοιπα δάχτυλα, έτσι ο σχηματισμός διαφέρει και στην κατασκευή. Έχει μια ειδική βάση για τον κινητήρα που τοποθετείται με τέτοιο τρόπο στην εσοχή της παλάμης ώστε να του χαρίσει μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων (Εικόνα 25).

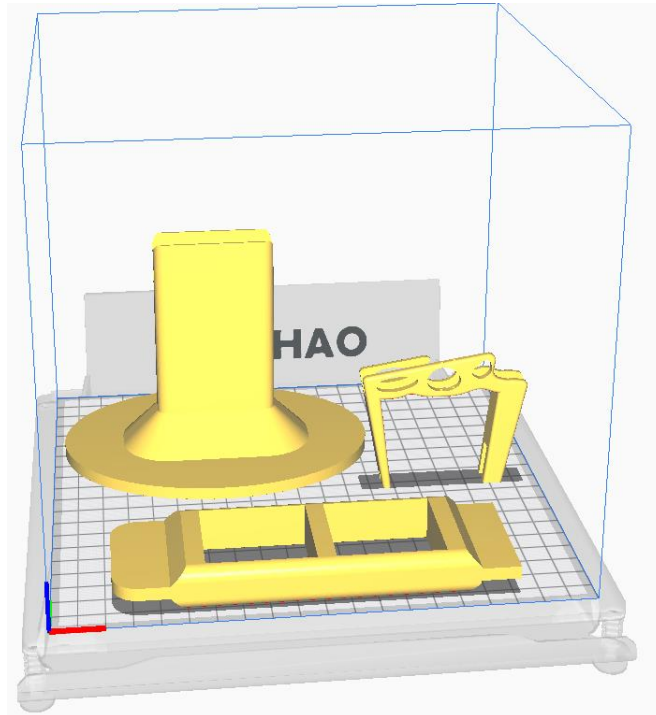


Εικόνα 25: 3D Απεικόνιση των κομματιών από τα οποία αποτελείται ο αντίχειρας. Στην πίσω σειρά είναι η βάση του σερβοκινητήρα του, η οποία τοποθετείται στην εσοχή της παλάμης και στην μπροστά γραμμή τα κομμάτια που σχηματίζουν το δάκτυλο, από την κλείδωση μέχρι την τελευταία άρθρωση.

Τέλος, ακολουθεί η απεικόνιση της βάσης της κατασκευή και ο πήχης (ο σύνδεσμος δηλαδή της παλάμης με την βάση της κατασκευής). Η βάση έχει μεγάλη στρογγυλή επιφάνεια για να δώσει μεγαλύτερη σταθερότητα στην κατασκευή. Ο χώρος που τοποθετούνται οι τέσσερις κινητήρες είναι ειδικά σχεδιασμένος έτσι ώστε να χωράνε δυο σε κάθε πλαίσιο, και η κατασκευή να γίνεται πιο συμπαγής. Τέλος ο σύνδεσμος με την παλάμη είναι ιδιαίτερα



σημαντικός έτσι ώστε να διαχωριστούν ακόμα μια φορά όλα τα νήματα που περνάνε από την παλάμη και καταλήγουν στους κινητήρες για την ομαλή λειτουργία του χεριού, χωρίς να παρεμβαίνει ο ένας κινητήρας στην λειτουργία του άλλου.



Εικόνα 26: 3D Απεικόνιση της βάσης στην οποία στηρίζεται όλη η κατασκευή (πίσω αριστερά), του χώρου όπου τοποθετούνται οι κινητήρες (μπροστά) και του κομματιού σύνδεσης του με την παλάμη (πίσω αριστερά).

### XIII. Περιγραφή της διαδικασίας εκτύπωσης ενός κομματιού

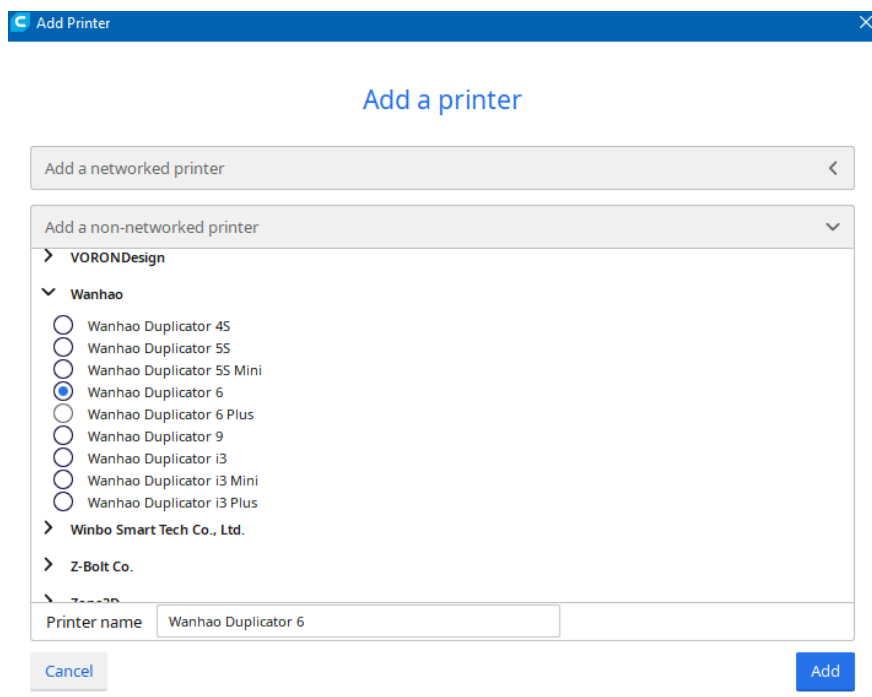
Η 3D εκτύπωση με την χρήση ενός 3D εκτυπωτή οικιακής χρήσης πραγματοποιείται συνήθως με δοκιμή και σφάλμα. Για την εκπόνηση αυτής, λοιπόν, της εργασίας χρειάστηκε να γίνουν αρκετές δοκιμές ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα, διότι δεν υπάρχουν προκαθορισμένες ρυθμίσεις για κάθε εκτυπωτή που να εγγυούνται την επιτυχία, παρακάτω περιγράφεται ενδεικτικά η διαδικασία που χρειάστηκε για να εκτυπωθεί ένα από τα κομμάτια της κατασκευής.

#### A. Άνοιγμα των αρχείων STL στο Cura

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, από την σχεδίαση των αρχείων που πρόκειται να εκτυπωθούν μέχρι την τελική τους μορφή υπάρχει μια διαδικασία αρκετά σημαντική που γίνεται σε όλους τους εκτυπωτές, αυτή η διαδικασία είναι γνωστή και ως διαδικασία τεμαχισμού (slicing process). Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται προγραμματισμός όλων των κινήσεων του εκτυπωτή για την δημιουργία του επιθυμητού κομματιού, κάθε φορά ανάλογα με τις ανάγκες και το σκοπό της χρήσης του. Με το πέρας των ρυθμίσεων, το

πρόγραμμα εξάγει ένα αρχείο gcode στο οποίο έχουν αποθηκευτεί όλες οι επιλογές που έχουν γίνει και είναι αυτό που διαβάζει και εκτελεί ο εκτυπωτής. Ίσως το πιο διαδεδομένο πρόγραμμα τεμαχισμού (slicing) είναι το open source (ανοιχτού κώδικα) πρόγραμμα Cura. Πρόκειται για ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο όπου οι επιλογές στις παραμετροποιήσεις είναι πάρα πολλές και είναι συμβατό με τα περισσότερα μοντέλα 3D εκτυπωτών που κυκλοφορούν στην αγορά. Προηγουμένως έγινε λεπτομερής περιγραφή του προγράμματος και των ρυθμίσεων που διαθέτει για την εκτύπωση ενός αντικειμένου. Στο σημείο αυτό θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη για την κατασκευή του κομματιού της βάσης της κατασκευής.

Το πρώτο βήμα που ακολουθείται ξεκινώντας το πρόγραμμα είναι ο ορισμός του 3D εκτυπωτή που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Ο κάθε εκτυπωτής διαφέρει και έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, όπως είναι το μέγεθος της τράπεζας, η θέση των αξόνων στην οποία θα βρίσκονται οι κινητήρες κλπ.



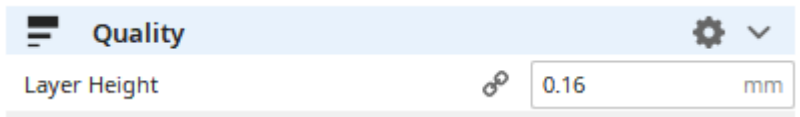
Εικόνα 27: Επιλογή του εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία

### B. Δημιουργία προφίλ εκτύπωσης

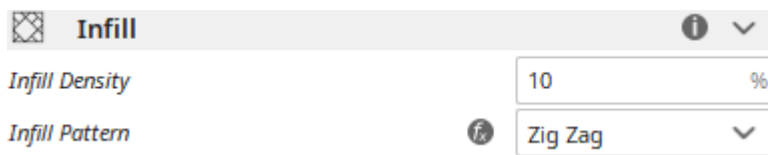
Το επόμενο βήμα και πιο σημαντικό είναι να η δημιουργία του προφίλ της εκτύπωσης. Στο σημείο αυτό ξεκινάει η δοκιμή καθώς αυτό είναι κάτι που όπως προαναφέρθηκε δεν έχει κάποιες σταθερές και ανάλογα με το αποτέλεσμα της εκτύπωσης πρέπει να κριθεί τι δε λειτουργήσει σωστά ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία από την αρχή (παραμετροποίηση).

Το πρόγραμμα Cura έχει αρκετές ρυθμίσεις που μπορούν να διαβαθμιστούν για να επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Στο παρακάτω κομμάτι θα περιγραφούν περισσότερο οι

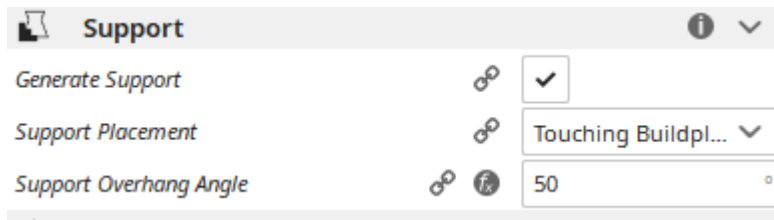
ρυθμίσεις αυτές που χρειάστηκαν να αναπροσαρμοστούν και όχι τόσο αυτές που ως επί το πλείστον, αν όχι συνέχεια, έμειναν στις προκαθορισμένες τιμές.



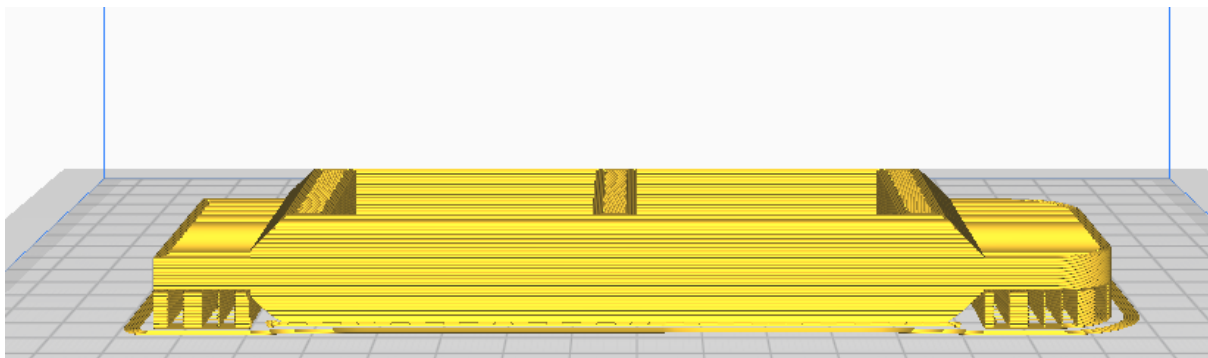
Το Layer Height, δηλαδή το ύψος που θα έχει κάθε στρώμα εκτύπωσης είναι μια από τις βασικές ρυθμίσεις κατά την διάρκεια της εκτύπωσης. Όταν ένα αντικείμενο είχε πολύπλοκο γεωμετρικό σχήμα και έπρεπε να εκτυπωθεί με μεγάλη λεπτομέρεια, παραδείγματος χάρη η παλάμη του χεριού ή ο σύνδεσμος μεταξύ του πήχη και της παλάμης, αυτή η τιμή χαμήλωνε αρκετά (υπήρξαν διακυμάνσεις στις τιμές από 0,08-0,14 mm). Με τον τρόπο αυτό όμως δημιουργούταν μια χρονική επιβάρυνση στην διαδικασία της εκτύπωσης. Αντίθετα, όταν τα αντικείμενα ήταν πιο απλά ως προς την γεωμετρία τους ή ήταν αρκετά ογκώδη χωρίς ιδιαίτερη λεπτομέρεια στην κατασκευή τους (π.χ. η βάση στην οποία στηρίζεται ο πήχης) η τιμή αυτή έπαιρνε μεγαλύτερες τιμές από 0.15-0.18 mm.



Στο γέμισμα υπάρχουν 2 παράμετροι που μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με το επιθυμητού αποτελέσματος. Η πρώτη παράμετρος, η οποία δεν χρειάστηκε να αλλαχθεί σε κάποια από τις εκτυπώσεις ήταν η μέθοδος με την οποία γεμίζει το σχέδιο. Το Cura δίνει πληθώρα επιλογών και μπορεί να ρυθμιστεί αναλόγως του τι επιθυμεί ο χρήστης, είτε να εστιάσει στην λεπτομέρεια είτε στην ταχύτητα είτε σε μια οικονομική εκτύπωση χωρίς την χρήση μεγάλης ποσότητας πλαστικού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέχθηκε η μέθοδος του zig zag που αποτελεί χρυσή τομή και ισορροπεί όλα τα παραπάνω κριτήρια που αναφέρθηκαν. Η δεύτερη επιλογή έχει να κάνει με το πόσο στιβαρό ή κούφιο επιθυμείται να είναι το σχέδιο προς εκτύπωση. Για παράδειγμα στο κομμάτι που εκτυπώθηκε για τερματικό στον αντίχειρα δε χρειάστηκε παραπάνω infill density από 10% ενώ στα κομμάτια που δέχονται περισσότερη δύναμη και πρέπει να είναι πιο στιβαρά (πήχης, βάση, παλάμη) η τιμή αυτή αυξήθηκε στο 20%.



Η στήριξη είναι μια ιδιαίτερα σημαντική ρύθμιση γιατί χωρίς αυτήν είναι πρακτικά αδύνατο να εκτυπωθούν ορισμένα κομμάτια. Υπήρξε καταλυτικό για το αποτέλεσμα το πως θα τοποθετηθούν τα κομμάτια για εκτύπωση γιατί ανάλογα με την γωνία που τοποθετούνται αλλάζει: ο χρόνος εκτύπωσης, το νήμα που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και το αν και πόσα στηρίγματα θα χρησιμοποιηθούν. Τα στηρίγματα είναι μικρά σαθρά κομμάτια πλαστικού, εύκολα να σπάσουν με το χέρι, και στόχος τους είναι να στηρίξουν το μοντέλο στις στρώσεις που είναι πιο δύσκολες να επιτευχθεί η εκτύπωση. Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα που χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν στηρίγματα. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι στην δεξιά και αριστερά πλευρά του πήχη υπάρχουν μικρές στρώσεις πλαστικού οι οποίες βοηθάνε στην εκτύπωση. Χωρίς την ύπαρξη αυτών των κομματιών, οι γωνίες δε θα μπορούσαν να σταθούν και το τελικό σχήμα της κατασκευής θα διέφερε αρκετά από αυτό το σχέδιο.



Εικόνα 28: Παράδειγμα χρησιμοποίησης στηριγμάτων κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης του πήχη.

Το Cura δίνει δυο επιλογές για την τοποθέτηση των στηριγμάτων, είτε στα κομμάτια που ακουμπάνε το buildplate, είτε παντού ανάλογα με την γωνία εξοχής που έχει επιλεγεί (η γωνία μπορεί να πάρει τιμές από 0 μοίρες μέχρι και 90).

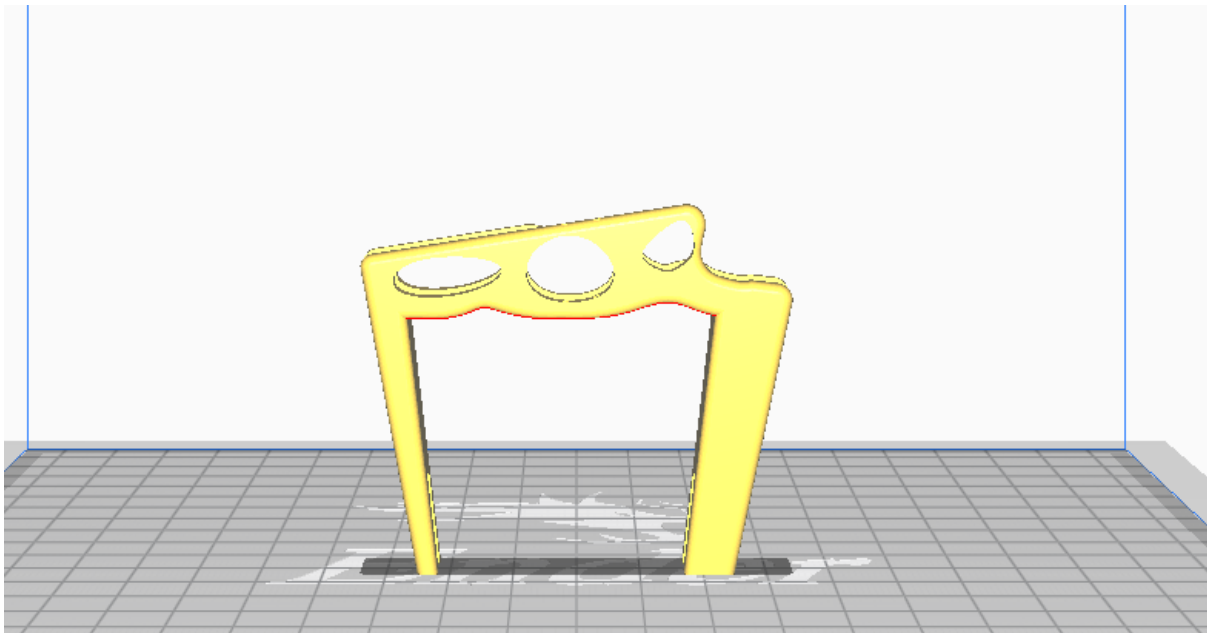


Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή η 3D εκτύπωση σε καμία των περιπτώσεων δεν είναι plug and play για αυτό το λόγο πριν ξεκινήσει να εκτυπώσει το μοντέλο που έχει μετατραπεί σε

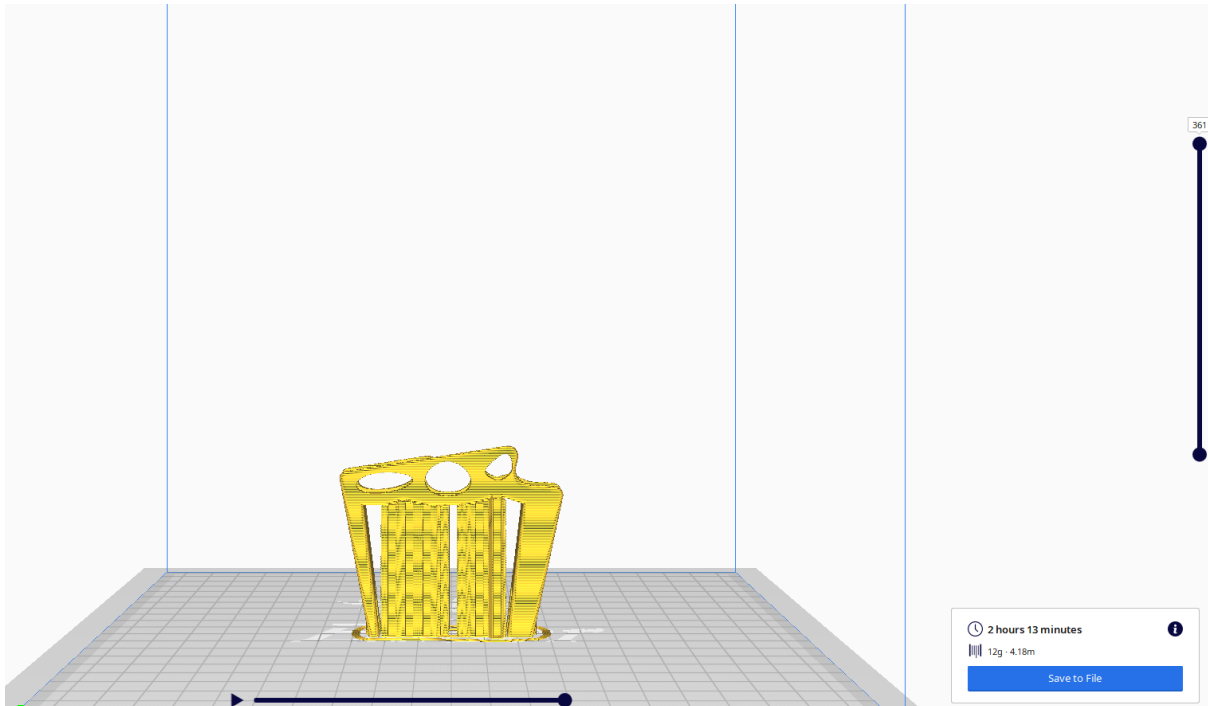
gcode, θα πρέπει να αφαιρεθούν από το ακροφύσιο του εκτυπωτή τυχόν υπολείμματα. Επειδή το brim και το raft είναι επιλογές που μένουν κολλημένες με το μοντέλο και αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται περισσότερη προσπάθεια για να αφαιρεθούν καθώς επίσης μετά την αφαίρεσή τους το αντικείμενο θα χρειάζεται περισσότερη κατεργασία (τριμμάρισμα) για να φτάσει στην τελική του μορφή. Επιπλέον πρόκειται για πιο δαπανηρές κατασκευές εφόσον καταναλώνουν περισσότερο νήμα για να κατασκευαστούν. Για τους παραπάνω λόγους, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η επιλογή skirt.

### C. Ορθή τοποθέτηση των αντικείμενων ανάλογα με το σχήμα τους

Ανάλογα με το σχήμα και με τις γεωμετρίες του κάθε μοντέλου πρέπει να μελετηθεί το πως θα τοποθετηθεί για την εκτύπωση. Συνήθως προτιμάται η πιο μεγάλη επιφάνεια του αντικειμένου να ακουμπάει πάνω στο build plate για να αποφευχθούν όσο το δυνατόν γίνεται η χρησιμοποίηση στηριγμάτων. Παραδείγματα όπου φαίνονται τα παραπάνω ακολουθούν στις επόμενες εικόνες.

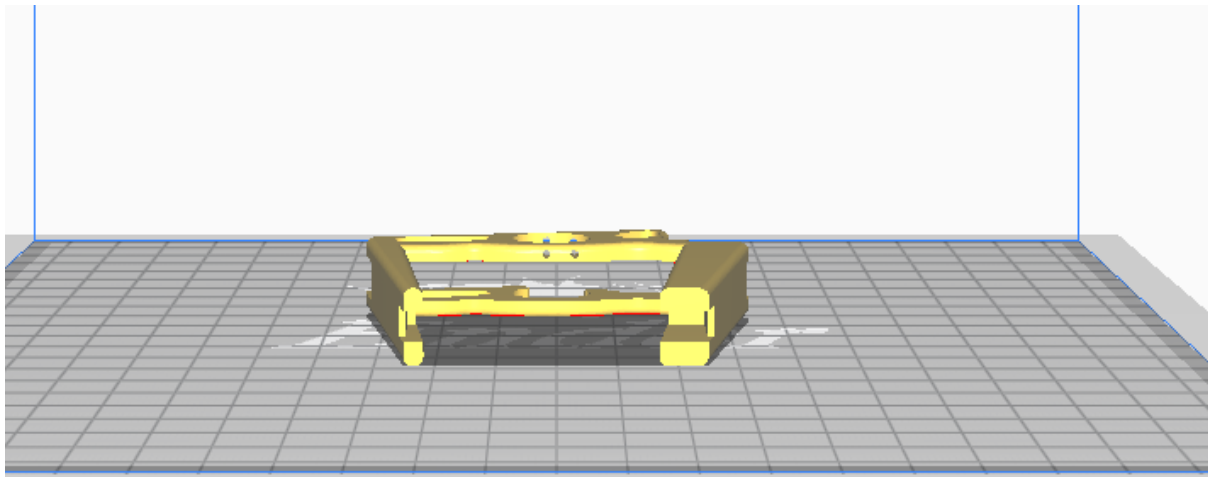


*Εικόνα 29: Απεικόνιση του κομματιού που συνδέει τον πήχη με την παλάμη. Στο σημείο που σχηματίζεται η καμάρα του αντικειμένου παρατηρείται μια κόκκινη γραμμή που έχει προσθέσει το πρόγραμμα. Αυτή η γραμμή δείχνει το σημείο στο οποίο θα τοποθετηθούν τα στηρίγματα που θα χρειαστεί για την ορθή εκτύπωση της κατασκευής.*

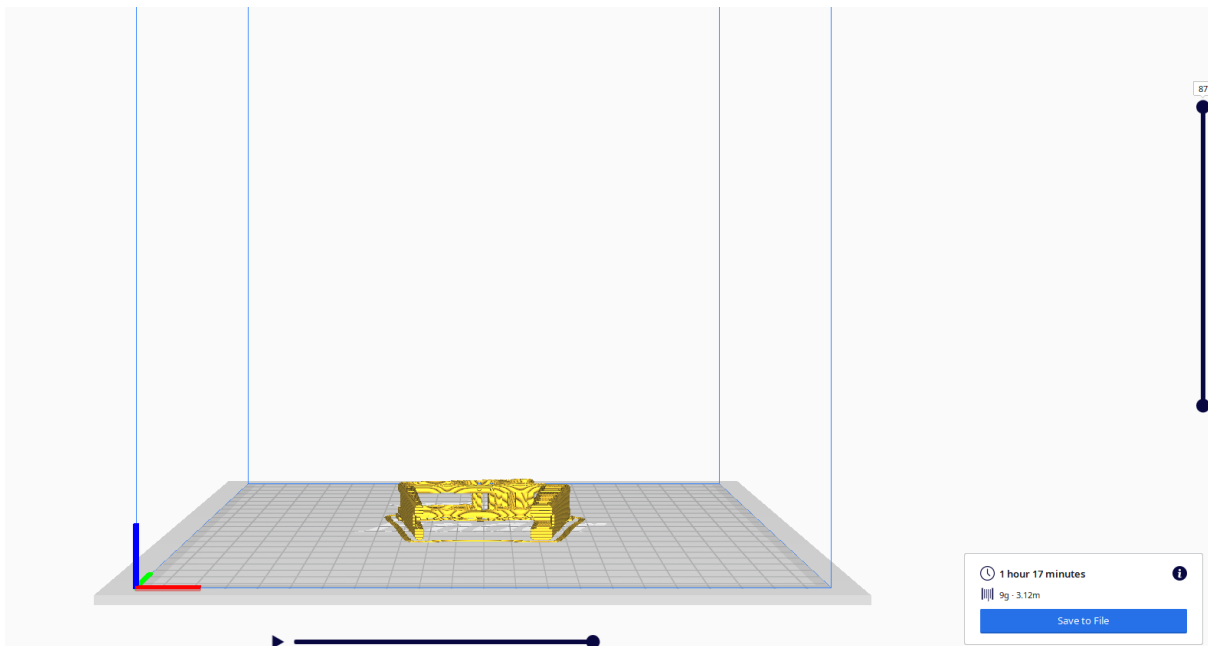


Εικόνα 30: Προεπισκόπηση της εκτύπωσης του κομματιού που συνδέει τον πήχη με την παλάμη. Διακρίνονται τα στηρίγματα που το πρόγραμμα έχει προσθέσει καθώς επίσης και η ενημέρωση του εκτιμώμενου χρόνου εκτύπωσης και της εκτιμώμενης ποσότητας νήματος που θα χρησιμοποιηθεί.

Με την αλλαγή της τοποθέτησης του κομματιού παρατηρείται επαναπροσδιορισμός τόσο των στηριγμάτων που θα χρησιμοποιηθούν όσο και του χρόνου εκτύπωσης και της ποσότητας του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την συγκεκριμένη εκτύπωση (Εικόνες 31, 32).



Εικόνα 31: αλλαγή της γωνίας τοποθέτησης του κομματιού που συνδέει τον πήχη με την παλάμη

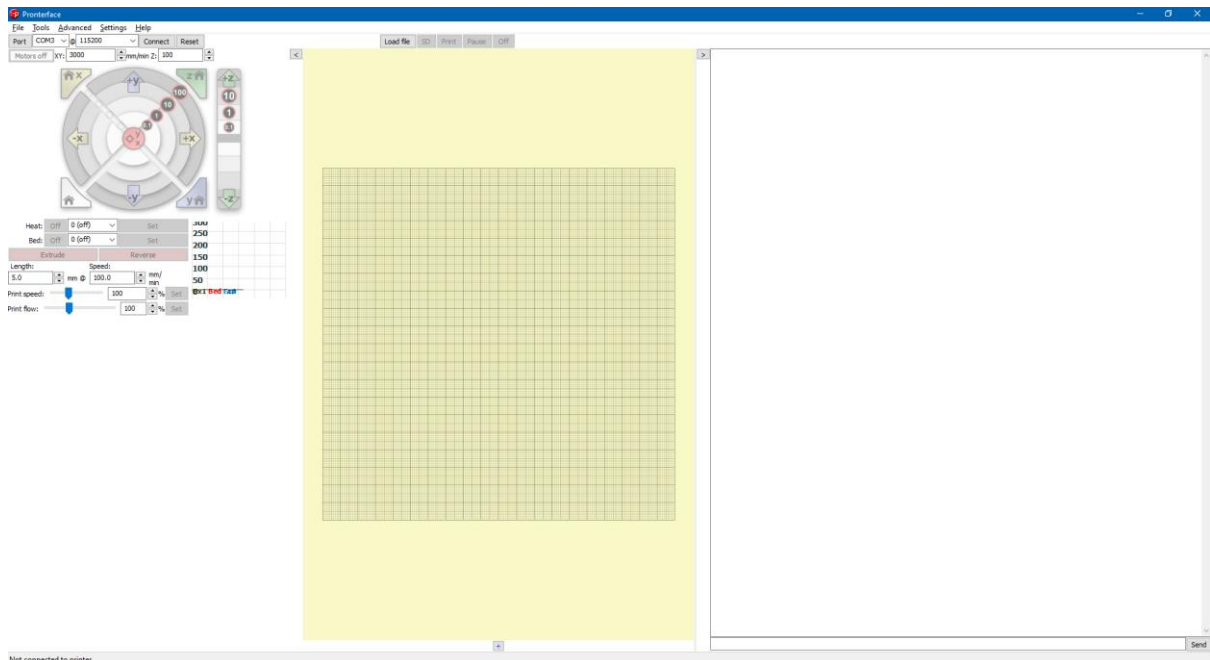


Εικόνα 32: Προεπισκόπηση της εκτύπωσης του κομματιού που συνδέει τον πήχη με την παλάμη. Διακρίνονται τα στηρίγματα που το πρόγραμμα έχει προσθέσει καθώς επίσης και η ενημέρωση του εκτιμώμενου χρόνου εκτύπωσης και της εκτιμώμενης ποσότητας νήματος που θα χρησιμοποιηθεί.

Και όπως φαίνεται από την προεπισκόπηση η εκτύπωση αυτή γίνεται σε λιγότερο χρόνο, μια ώρα και δεκαεπτά λεπτά, ενώ καταναλώνει πολύ λιγότερο νήμα, 9 γραμμάρια νήματος που αντιστοιχούν σε 3.12 μέτρα. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι η ορθή τοποθέτηση των κομματιών είναι πολύ σημαντική καθώς επηρεάζει άμεσα τον χρόνο της εκτύπωσης και την ποσότητα υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

#### D. Βαθμονόμηση του εκτυπωτή

Μετά από αρκετές εκτυπώσεις έχει παρατηρηθεί ότι ο εκτυπωτής εμφανίζει κάποιες αποκλίσεις πάνω στις κινήσεις του στους τρεις διαφορετικούς άξονες στους οποίους έχει προγραμματισθεί να κινείται. Για αυτό τον λόγο είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν παρατηρείται ένα τέτοιο φαινόμενο να γίνεται μια βαθμονόμηση στους μηχανισμούς του. Πολλές φορές κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί και από το κεντρικό μενού του εκτυπωτή, στη συγκεκριμένη εργασία όμως προτιμήθηκε το γραφικό περιβάλλον του Pronterface που με την χρήση εντολών G-code είναι εφικτό να επιτευχθεί το αποτέλεσμα με μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του άξονα z του εκτυπωτή. Ο άξονας z είναι υπεύθυνος για το πόσο ψηλά ή χαμηλά βρίσκεται η μύτη του εκτυπωτή από την οποία περνάει το πλαστικό νήμα, λιώνει και έπειτα εκχυλίζεται πάνω στην πλάκα (bed) του εκτυπωτή. Το ύψος του άξονα θα πρέπει να είναι όσο δυνατόν χαμηλότερα γίνεται για μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά σε καμία περίπτωση δε θα πρέπει να ακουμπάει την πλάκα του εκτυπωτή. Η ιδανική απόσταση που θα πρέπει να έχει, είναι περίπου όσο το πάχος μιας σελίδας A4.



Εικόνα 32: Γραφικό περιβάλλον τις εφαρμογής Pronterface. Αριστερά μπορούμε επιλέξουμε να κινηθούν όλοι οι άξονες στην αρχική τους θέση (home), αλλά και να επιλέξουμε να κινησουμε τον καθένα ξεχωριστά, ενώ δεξιά μπορούμε να γράψουμε τις εντολές που θέλουμε

## Ε. Εντολές για την βαθμονόμηση του άξονα Z

Παρακάτω αναγράφονται οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στο Pronterface για την βαθμονόμηση του άξονα Z:

1. Home 3D printer
2. M851 Z0 – Αρχικοποιεί το Offset του Z0
3. M500 – Αποθηκεύει τις ρυθμίσεις στην μνήμη Eeprom
4. M501 – Αρχικοποιεί τις τρέχουσες παραμέτρους
5. M503 – Εμφανίζει στην οθόνη της παραμέτρους
6. G28 Z – Μεταφέρει τον άξονα Z στο σημείο 0
7. G1 F60 Z0 – Μετακίνηση της μύτης του εκτυπωτή στο πραγματικό σημείο 0
8. M211 S0 – Απενεργοποίηση των Endstops για να μπορεί να μετακινηθούν οι κινητήρες του εκτυπωτή ελεύθερα
9. Μετακίνηση της μύτης του εκτυπωτή όσο δυνατόν πιο κοντά στο bed (τόσο κοντά όσο περίπου το πάχος μια κόλλας A4)
- 10 Σημείωση του νούμερου στον άξονα Z που εμφανίζεται στην οθόνη
11. M851 Z X.XX – Αντικατάσταση του νούμερου που βρέθηκε στην προηγούμενη μέτρηση



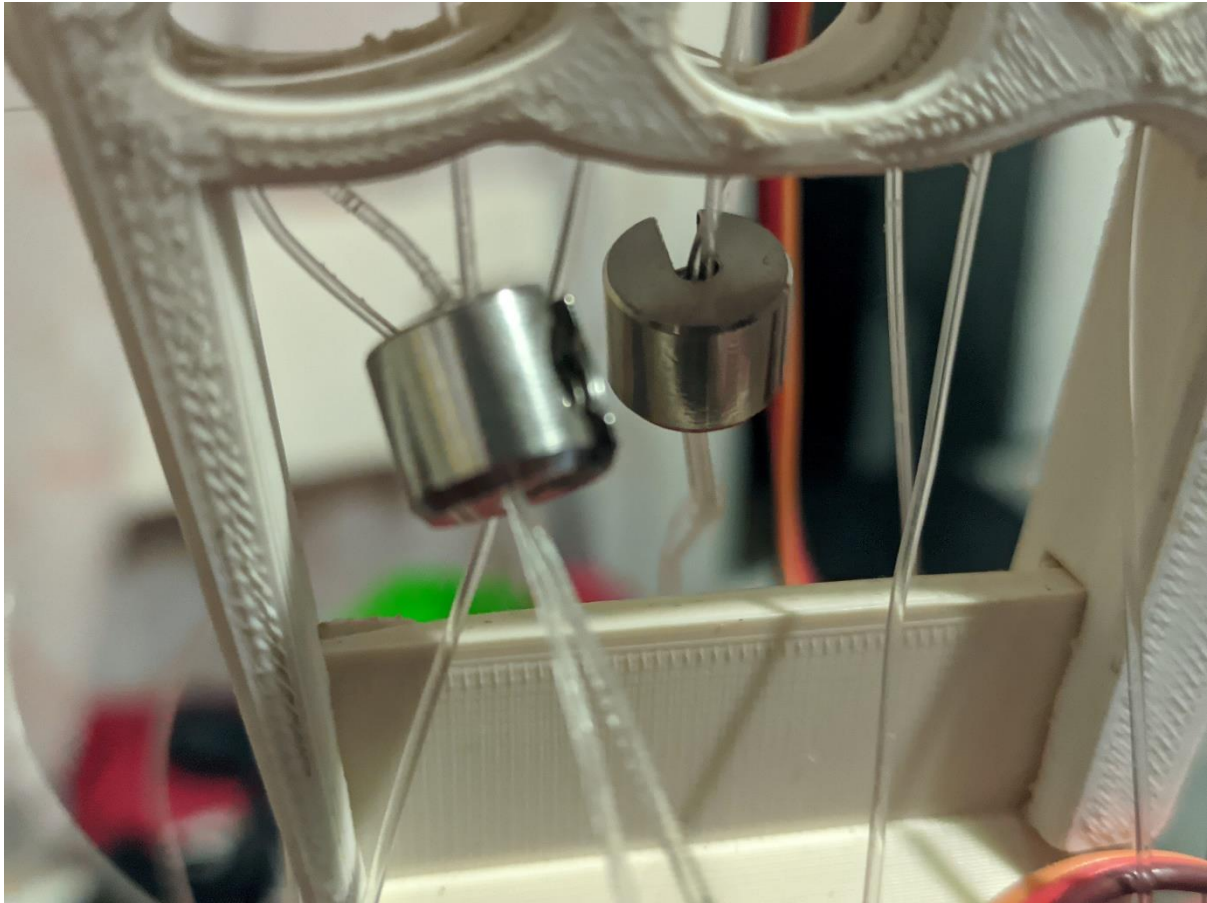
12. M211 S1 – Ενεργοποίηση των Endstops
13. M500 – Αποθήκευση των ρυθμίσεων στην μνήμη Eeprom
14. M501 – Ενεργοποίηση των νέων παραμέτρων
15. M503 – Εμφάνιση στην οθόνη των νέων παραμέτρων

#### XIV. Συναρμολόγηση του χεριού

Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω για να επιτευχθεί η επιθυμητή κίνηση των δακτύλων κάθε άρθρωση διαθέτει δυο οπές, μια στο πάνω κομμάτι της και μια στο κάτω, από τις οποίες περάστηκαν δυο ξεχωριστές πετονιές. Η μία πετονιά χρησιμοποιείται για την επίτευξη του ανοίγματος των δακτύλων και η άλλη για την αντίθετη κίνηση, δηλαδή το κλείσιμο των δακτύλων. Οι πετονιές δέθηκαν στις άκρες των δακτύλων για να κρατηθούν σταθερές. Για να είναι ακόμα πιο σταθερή η κατασκευή περάστηκαν μεταλλικοί άξονες διαμετρικού πάχους 1mm ανάμεσα στις αρθρώσεις καθώς και στους συνδέσμους με την παλάμη. Τέλος για την αποφυγή της χαλάρωσης της πετονιάς, καθώς πρόκειται για υλικό με αυξημένη ελαστικότητα, χρησιμοποιήθηκαν κάποια τερματικά (stoppers) όπως φαίνονται στην Εικόνα 34. Λόγω της συνεχής συστολής και διαστολής των άκρων από τους κινητήρες, παρατηρήθηκε ότι μετά από αρκετές χρήσεις τα νήματα άρχισαν να χαλαρώνουν με αποτέλεσμα να μην μπορούν να κλείσουν και να ανοίξουν τα δάχτυλα. Μετά την τοποθέτηση των τερματικών με διάμετρο 1mm το φαινόμενο αυτό ελαχιστοποιήθηκε.

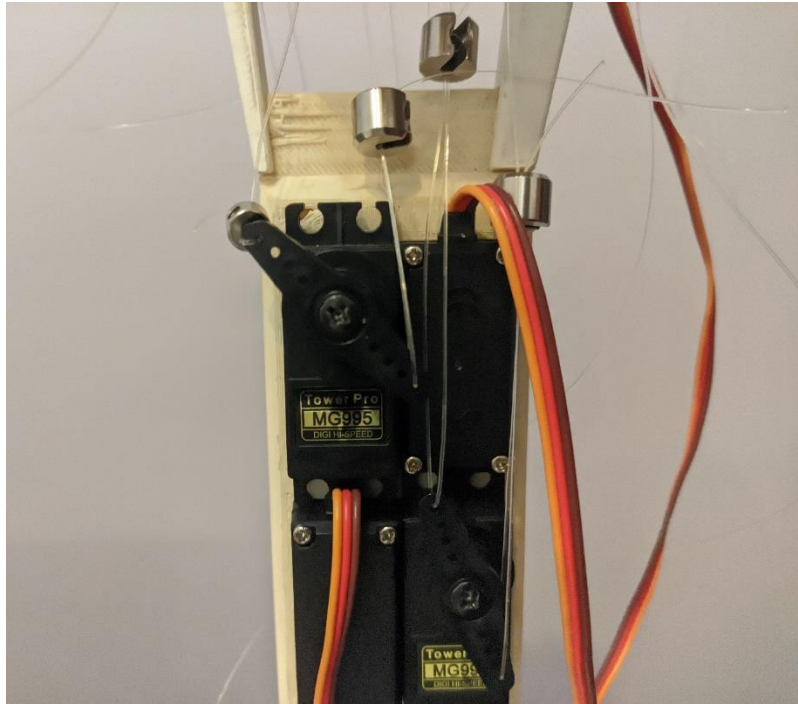


Εικόνα 33: Απεικόνιση τελικής συναρμολόγησης ενός δακτύλου ενδεικτικά.



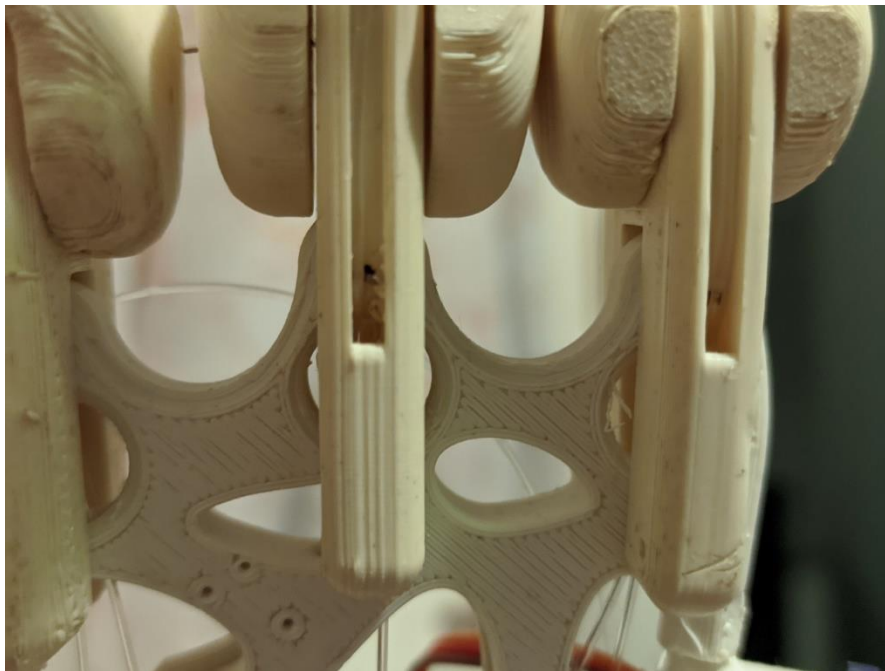
*Εικόνα 34: Τα stoppers που χρησιμοποιήθηκαν για την συγκράτηση των πετονιών*

Οι κινητήρες τοποθετήθηκαν στον πήχη του χεριού, στην ειδική εσοχή που είχε σχεδιαστεί για να χωράνε. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 35 είναι ακριβώς ο ένας δίπλα στον άλλο χωρίς να υπάρχουν περιθώρια μετακίνησης τους σε καμία κατεύθυνση, γεγονός που κάνει την βάση της κατασκευής πιο συμπαγή και σταθερή. Η τοποθέτηση αυτή έγινε έτσι ώστε ο χρήστης να είναι ευέλικτος να κινεί όποιοι κινητήρα θελήσει, χωρίς η κίνηση του ενός να παρεμβαίνει στην κίνηση του άλλου και να δημιουργεί προβλήματα στην κίνηση των δακτύλων.



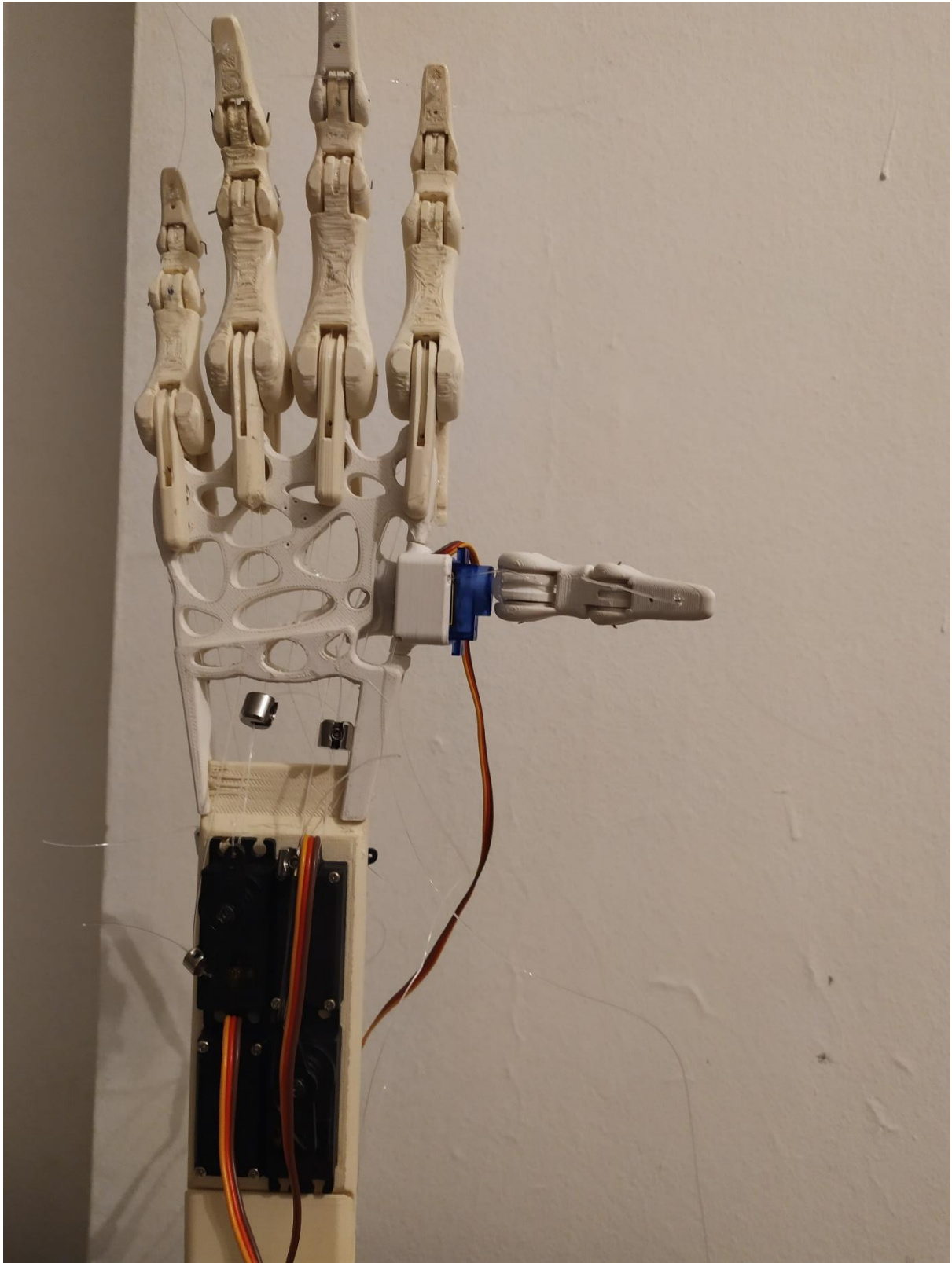
*Εικόνα 35: Τοποθέτηση των κινητήρων στον πύλο της κατασκευής*

Όπως και στις αρθρώσεις των δαχτύλων έτσι και στις κλειδώσεις τοποθετήθηκαν μικροί άξονες στο σημείο τομής τους με την παλάμη. Με αυτό τον τρόπο η κατασκευή γίνεται πιο σταθερή και οι κινήσεις των δαχτύλων αποκτούν μεγαλύτερη ακρίβεια.



*Εικόνα 36: Τοποθέτηση μεταλλικών αξόνων μεταξύ των κλειδώσεων και την παλάμης.*

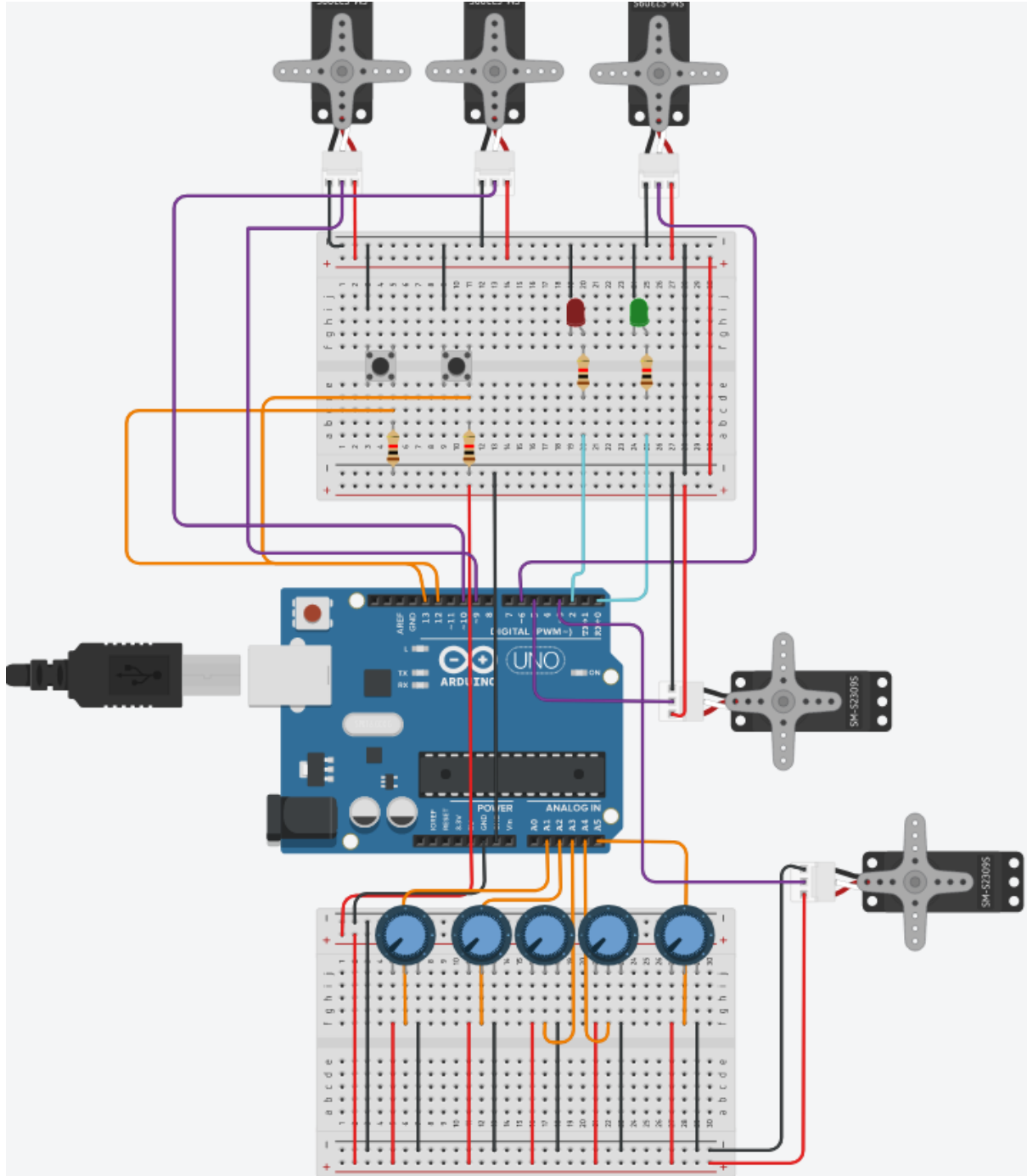
Ακολουθεί απεικόνιση ολόκληρου του ρομποτικού χεριού μετά την ολοκλήρωση της συναρμολόγησής του και την τοποθέτηση των κινητήρων σε αυτό για τον προγραμματισμό των κινήσεων (Εικόνα 37).



Εικόνα 37: Ολοκληρωμένη κατασκευή ρομποτικού χεριού

## XV. Συνδεσμολογία ποτενσιόμετρων led και servo στο Arduino

Παρακάτω φαίνεται το σχηματικό με την συνδεσμολογία όλων των εξαρτημάτων με το Arduino.



Εικόνα 38: Συνδεσμολογία όλων των εξαρτημάτων στο Arduino UNO

Όπως φαίνεται στην παραπάνω Εικόνα υπάρχουν δυο διαφορετικά breadboard. Στο πάνω έχουν τοποθετηθεί δυο pushbuttons, για να μπορεί να επιλέξει ο χρήστης αν θα ήθελε να δει κάποιες προκαθορισμένες κινήσεις που έχουν προγραμματιστεί στο χέρι (demo) είτε να

αποκτήσει τον πλήρη έλεγχο του χεριού (manual) . Με το πάτημα του κουμπιού demo (δεξί pushbutton που είναι συνδεδεμένο στην θέση D12) ανάβει το κόκκινο led και το χέρι κάνει 4 διαφορετικές κινήσεις, οι οποίες εναλλάσσονται κάθε φορά που πατιέται το κουμπί. Στην αντίθετη περίπτωση, ο χρήστης επιλέγει το κουμπί manual και ανάβει το πράσινο led. Με αυτό τον τρόπο αναλόγως ποιο ποτενσιόμετρο γυρίσει θα γυρίσει και ο αντίστοιχος κινητήρας.

Τα ποτενσιόμετρα είναι ηλεκτρονικές αναλογικές συσκευές και επί της ουσίας είναι μεταβλητοί αντιστάτες ρεύματος. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να δώσει μια τιμή μεταξύ 0-5 Volt αναλόγως πόσο θα περιστρέψει το διακόπτη. Έχουν τρεις ακροδέκτες, εκ των οποίων οι δυο στα άκρα πηγαίνουν στην τροφοδοσία και την γείωση αντίστοιχα, ενώ ο κεντρικός συνδέεται με την συσκευή στην οποία θα διαβάσει τις τιμές του. Προφανώς επειδή δίνουν αναλογικό σήμα εισόδου, συνδέθηκαν στα αντίστοιχα pins του Arduino.

Το Arduino διαθέτει 14 ψηφιακά pins εκ των οποίων τα 6 μπορούν και παρέχουν PWM (Pulse Width Modulation) και στα οποία συνδέθηκαν οι κινητήρες. Η τεχνική αυτή μπορεί να μεταφέρει τις διάφορες μεταβολές των αναλογικών σημάτων εισόδου από τα ποτενσιόμετρα, σε ψηφιακά σήματα εξόδου. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ψηφιακά pins που μπορούν να αποτυπώσουν μόνο δυο σήματα εξόδου τα PWM μπορούν μέχρι 1024. Για αυτό τον λόγο επιλέχθηκαν να συνδεθούν στις συγκεκριμένες θέσεις οι σερβοκινητήρες.

Τέλος και στα pushbuttons αλλά και στα led έχουν συνδεθεί αντιστάσεις 1kΩ. Οι αντιστάσεις αυτές είναι pull-down έχουν δηλαδή ως στόχο να κρατήσουν το σήμα που δέχονται οι συσκευές κοντά στα 0V (να είναι ανενεργές) μέχρις ότου δεχθούν ένα σήμα εισόδου. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η σταθερότητα της λειτουργίας τους.

## A. Προγραμματίζοντας το Arduino

Ο προγραμματισμός του Arduino έγινε χρησιμοποιώντας το γραφικό περιβάλλον του μικροελεγκτή, Arduino IDE. Στόχος ήταν να προσφέρει στον χρήστη δύο επιλογές, μια που το χέρι θα κάνει αυτοματοποιημένες κινήσεις με το πάτημα του κουμπιού demo, και μία που θα μπορεί να χρησιμοποιεί με μία αυτονομία κουνώντας κάθε δάχτυλο ξεχωριστά με την χρήση των ποτενσιόμετρων. Ακολουθεί η παρουσίαση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό του ρομποτικού χεριού που κατασκευάστηκε στην παρούσα εργασία.

Ένα πρόγραμμα αποτελείται πάντα από δύο βασικά τμήματα (συναρτήσεις):

- Τμήμα 1 με ονομασία setup(): τι τμήμα αυτό εκτελείται μόνο μία φορά κάθε φορά που ξεκινάει το πρόγραμμα. Σε αυτό το τμήμα γράφονται τα ονόματα των μεταβλητών και η αρχικοποίηση αυτών.
- Τμήμα 2 με ονομασία loop(): το τμήμα αυτό εκτελείται συνέχεια κάθε φορά που εκτελείται το πρόγραμμα. Στο τμήμα αυτό βρίσκονται οι εντολές οι οποίες λένε στην κατασκευή πως να λειτουργήσει.

Είναι γνωστό ότι υπάρχουν τρεις θέσεις, όπου οι μεταβλητές μπορούν να δηλωθούν στη γλώσσα προγραμματισμού C++: μέσα σε μια συνάρτηση (τοπικές μεταβλητές ή local variables), εκτός των συναρτήσεων (καθολικές μεταβλητές ή global variables) και τέλος στον

ορισμό των παραμέτρων λειτουργίας (τυπικές παράμετροι ή formal parameters) [24]. Οι μεταβλητές global ορίζονται συνήθως στην κορυφή του προγράμματος και διατηρούν τις τιμές τους καθ'όλη της διάρκειας ζωής του προγράμματος. Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα ως global μεταβλητές δηλώνονται :

- Οι κινητήρες που θα χρησιμοποιηθούν
- Οι θέσεις στις οποίες βρίσκονται τα LED και τα pushbuttons
- Οι αρχικές καταστάσεις των κουμπιών Demo και manual
- Ο μετρητής του κουμπιού demo
- Οι θέσεις στις οποίες είναι συνδεδεμένες τα ποτενσιόμετρα
- Οι μεταβλητές στις οποίες θα εκχωρούνται οι τιμές των ποτενσιόμετρων

Όταν χρησιμοποιούνται κινητήρες servo, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη Servo.h, στην οποία συμπεριλαμβάνονται εντολές για τον έλεγχο τους. Στον παρακάτω κώδικα χρησιμοποιήθηκαν οι:

- Servo.attach - Για να μπορούν οι κινητήρες να δηλωθούν σε ποια pins είναι συνδεδεμένοι
- Servo.write Για να πάρουν συγκεκριμένες τιμές έτσι ώστε να κινηθούν

Για την καλύτερη κατανόηση του κώδικα χρειάζεται να γίνουν μερικές διευκρινήσεις.

- Όπως έχει προαναφερθεί το ποτενσιόμετρο μπορεί να πάρει τιμές από 0-5V. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι τιμές που θα βγαίνουν από το pin στην ψηφιακή μεριά του Arduino να κυμαίνονται από 0 έως 1023. Η εντολή servo.write δέχεται όμως τιμές από 0-180, για αυτό τον λόγο θα πρέπει να γίνει μια αντιστοίχιση. Αρχικά διαβάζεται η τιμή του ποτενσιόμετρου με την εντολή analogRead(), και αποθηκεύεται στην μεταβλητή valpot. Έπειτα γίνεται η χρήση της εντολής map όπου κάνει αντιστοίχιση της τιμής valpot από τα αρχικά όρια (0-1023) στα νέα (0-180).
- Όσον αφορά το κομμάτι του Demo, το χέρι έχει προγραμματιστεί να κάνει τρεις διαφορετικές κινήσεις για λόγους επίδειξης. Σε αυτήν την λειτουργία μπαίνει όταν πατηθεί από τον χρήστη το αντίστοιχο κουμπί (pushbutton στην θέση 12). Για να μπορούν να εναλλάσσονται οι κινήσεις, έχει τοποθετηθεί ένας μετρητής, ώστε κάθε φορά που πατιέται το κουμπί του demo να πραγματοποιείται μια διαφορετική κίνηση π.χ. την πρώτη φορά θα πάει στο πρώτο case της switch, την δεύτερη στο δεύτερο και την τρίτη στο τρίτο. Μόλις ολοκληρωθούν και οι τρεις κινήσεις το χέρι επιστρέφει στη λειτουργία manual όπου ο χρήστης τον ελέγχει με την χρήση ποτενσιόμετρων.

```
/* Έχουμε συνδέσει για αρχή τρεις κινητήρες,  
 * Ο χρήστης καλείται να επιλέξει μεταξύ 2 modes (manual και demo). Στο  
 manual  
 * οι κινητήρες είναι συνδεδεμένοι με τρία ποτενσιόμετρα  
 * κάθε φορά που γυρίζουμε το ένα κουνιέται ο αντίστοιχος κινητήρας.  
 * Στο demo υπάρχουν τρεις διαφορετικές κινήσεις και κάθε φορά που ο χρήστης  
 πατάει το κουμπί του demo
```

```
* αυτές εναλλάσσονται. Ανάλογα ποιο mode έχει επιλέξει ο χρήστης ανάβει
και το αντίστοιχο led, μπορεί οποιαδήποτε
* στιγμή να πάει από το auto στο manual και το αντίστροφο
*/

#include <Servo.h>
Servo servo1,servo2,servo3,servo4,servo5;

const byte buttonPin = 12;
const byte button2Pin = 13;
const byte LED = 2;
const byte LED2 = 0;

byte currentButtonStateAuto = LOW;
byte previousButtonStateAuto = LOW;
byte buttonManual = LOW;
bool demoFlag = false;

int counter = 0;
int pot1 = A1;
int pot2 = A2;
int pot3 = A3;
int pot4 = A4;
int pot5 = A5;

int valpot1;
int valpot2;
int valpot3;
int valpot4;
int valpot5;

void setup()
{

  pinMode(buttonPin, INPUT);
  pinMode(button2Pin, INPUT);
  pinMode(LED, OUTPUT);
  pinMode(LED2, OUTPUT);
  servo1.attach(10);
  servo1.write(0);
  servo2.attach(9);
  servo2.write(0);
  servo3.attach(6);
  servo3.write(0);
  servo4.attach();
  servo4.write(5);
  servo5.attach(3);
  servo5.write(0);
  /*
  * Σε αυτό το σημείο δηλώνουμε τα buttons και τα LED
  * σαν στοιχεία εισόδου και εξόδου αντίστοιχα.
  */
}
```



```

* Δηλώνουμε σε ποιές θέσεις του Arduino είναι τοποθετημένα τα servos
* και τα αρχικοποιούμε ώστε να ξεκινάνε από την θέση 0, σχηματίζοντας
έτσι μια γροθιά
*/
}

void loop()
{
  currentButtonStateAuto = digitalRead(buttonPin);
  buttonManual = digitalRead(button2Pin);

  if(buttonManual == HIGH )
  {
    while(currentButtonStateAuto == LOW)
    {
      digitalWrite(LED2, LOW);
      digitalWrite(LED, HIGH);

/*Το παρακάτω πρόγραμμα τρέχει όταν ο χρήστης έχει πατήσει το κουμπί για
το
* manual mode και θα σταματήσει όταν πατηθεί το κουμπί για το demo.
* Αναλόγως ποια επιλογή έχουμε επιλέξει ανάβει το αντίστοιχο led
*/

      valpot1 = analogRead(pot1);
      valpot1 = map (valpot1, 0, 1023, 0, 180);
      servo1.write(valpot1);
      delay(5);
      valpot2 = analogRead(pot2);
      valpot2 = map (valpot2, 0, 1023, 0, 180);
      servo2.write(valpot2);
      delay(5);
      valpot3 = analogRead(pot3);
      valpot3 = map (valpot3, 0, 1023, 0, 180);
      servo3.write(valpot3);
      delay(5);
      valpot4 = analogRead(pot4);
      valpot4 = map (valpot4, 0, 1023, 0, 180);
      servo4.write(valpot4);
      delay(5);
      valpot5 = analogRead(pot5);
      valpot5 = map (valpot5, 0, 1023, 0, 180);
      servo5.write(valpot5);
      delay(5);

/*
* Τα ποτενσιόμετρα έχουν συνδεθεί στις αναλογικές θέσεις του Arduino
* A1-A5, αναλόγως ποιο ποτενσιόμετρο γυρίζει ο χρήστης και με την
βοήθεια της εντολής
* map, κινείται ο αντίστοιχος κινητήρας
*/
}

```

```

}
if ( currentButtonStateAuto == HIGH)
{
    demoFlag = true;
    counter = 0;
    buttonManual = LOW;
    digitalWrite(LED, LOW);
    digitalWrite(LED2, HIGH);
while (demoFlag)
    {
        if ( digitalRead(buttonPin) == HIGH)
        {
            if (counter > 3)
            {
                counter = 0;
            }
            else
            {
                counter += 1;
            }
        }

        if (digitalRead(button2Pin) == HIGH)
        {
            demoFlag = false;
        }

        switch (counter)
        {
        case 1:
            servo1.write(180);
            servo2.write(0);
            servo3.write(180);
            servo4.write(180);
            servo5.write(90);
            delay(13);
            break;

        case 2:
            servo1.write(0);
            servo2.write(180);
            servo3.write(180);
            servo4.write(180);
            servo5.write(180);
            delay(13);
            break;

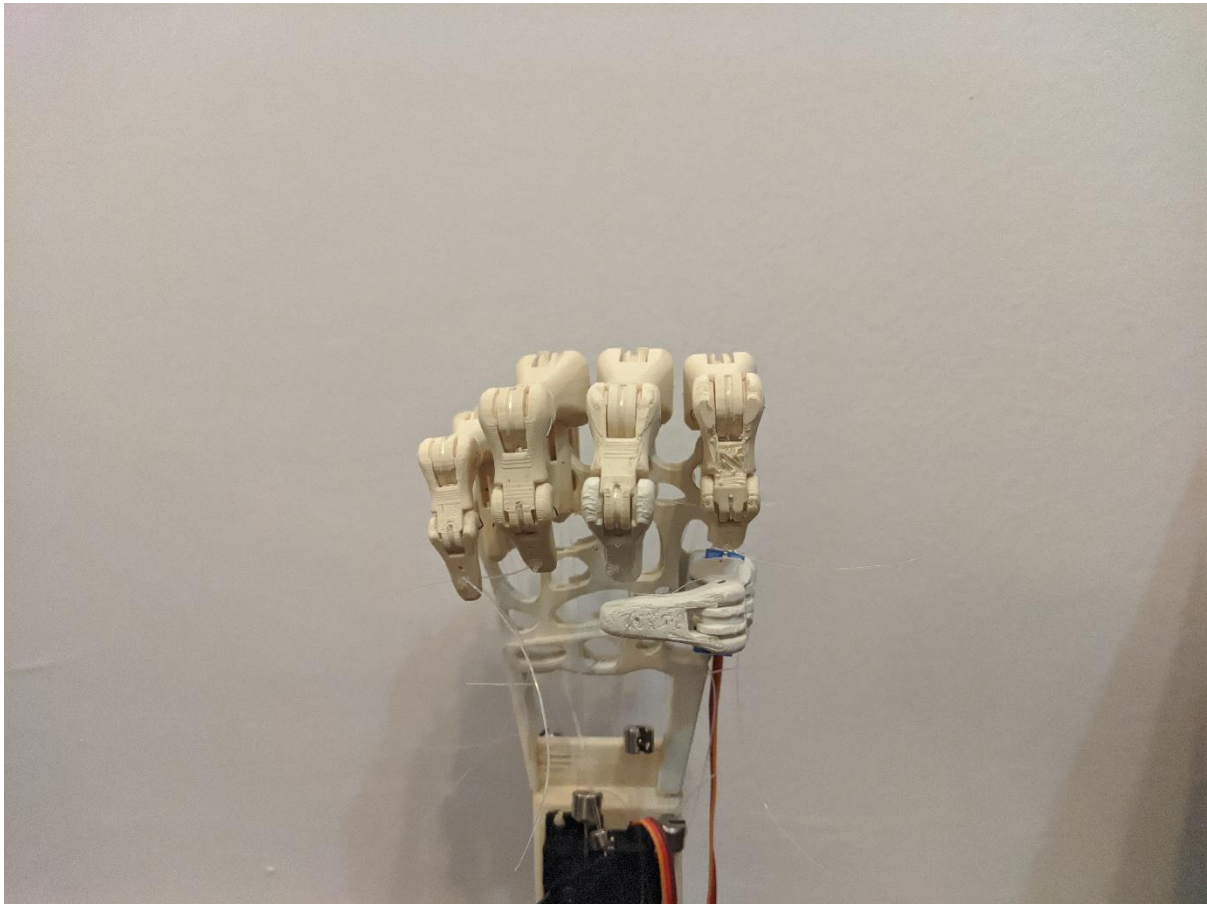
        case 3:
            servo1.write(0);
            servo2.write(0);
            servo3.write(0);
            servo4.write(0);

```

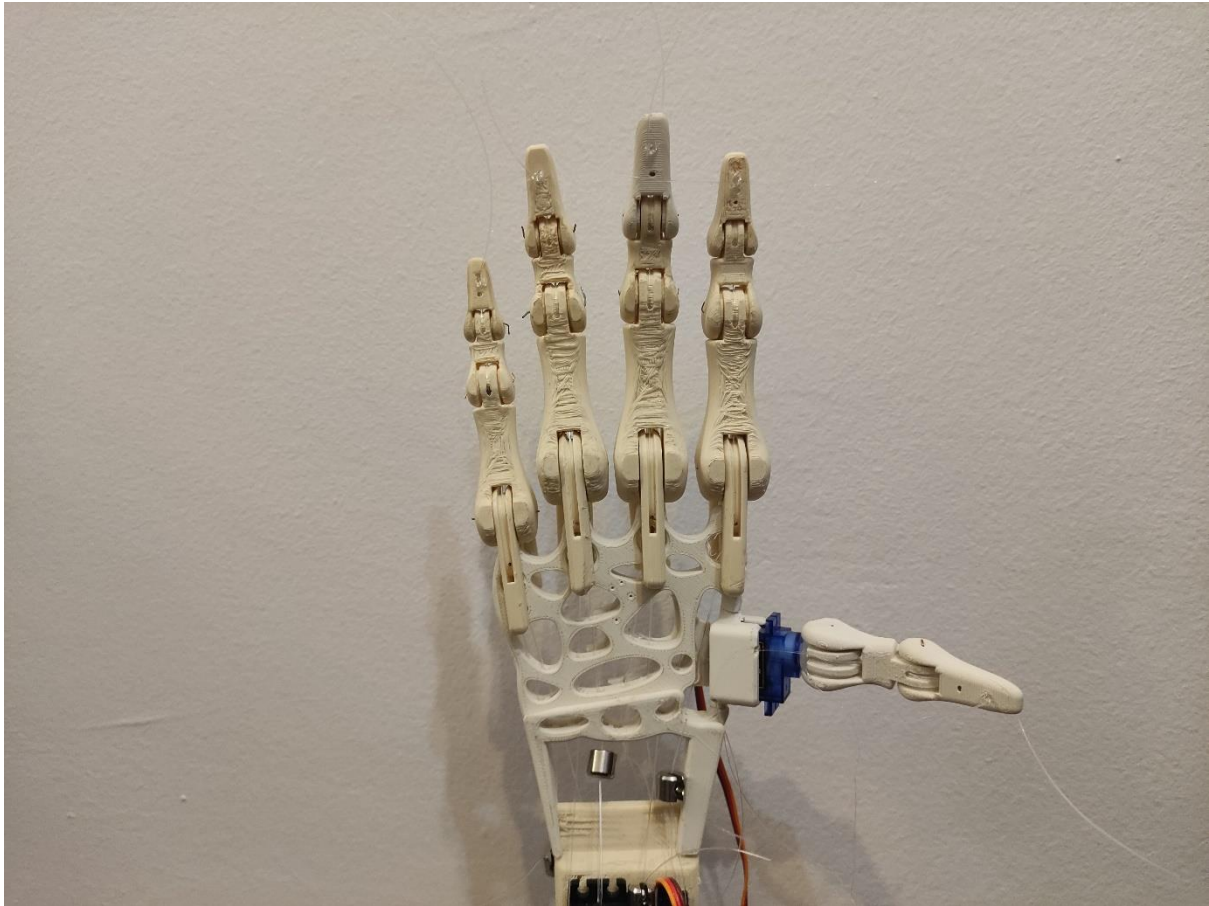
```
servo5.write(180);  
delay(13);  
break;  
  
default:  
servo1.write(180);  
servo2.write(0);  
servo3.write(0);  
servo4.write(0);  
servo5.write(90);  
counter = 0;  
}  
}  
}  
}
```

## XVI. Παραδείγματα κίνησης του χεριού

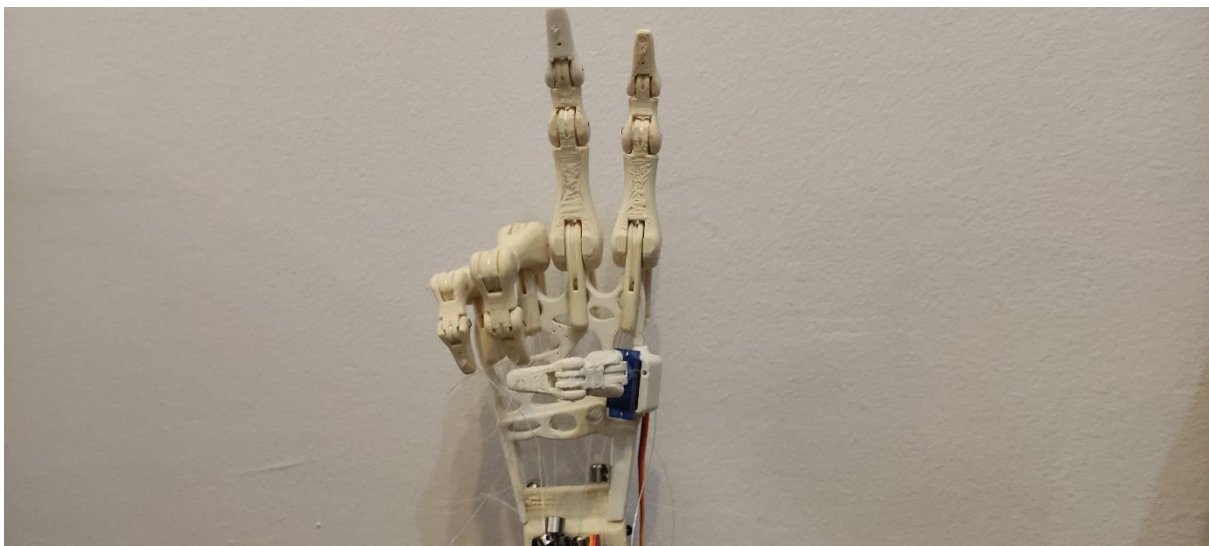
Παρακάτω ακολουθούν μερικές φωτογραφίες με τις κινήσεις που είναι προγραμματισμένο να κάνει το χέρι κατά την επιλογή του demo mode από τον χρήστη.



Εικόνα 39: Κίνηση πρώτη από το demo mode: Κλείσιμο όλων των δακτύλων του χεριού στην παλάμη (γροθιά)



*Εικόνα 40: Κίνηση δεύτερη από το demo mode: Άνοιγμα όλων των δακτύλων του χεριού σε όρθια, τεντωμένη θέση*



*Εικόνα 41: Κίνηση τρίτη από το demo mode*



Εικόνα 42: Δυνατότητα συγκράτησης αντικειμένου (μπάλας), του ρομποτικού χεριού, αποδεικνύοντας την εύρυθμη λειτουργία του.

## XVII. Συμπεράσματα από την εκπόνηση της εργασίας

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετήθηκε το πως μπορεί να κατασκευαστεί ένα ρομποτικό χέρι με την χρήση 3D εκτυπωτή για την δημιουργία των κομματιών καθώς και την χρησιμοποίηση του μικροεπεξεργαστή Arduino Uno για τον πλήρη έλεγχο του. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, η κατασκευή και κίνηση του ρομποτικού χεριού με την χρήση κουμπιών επετεύχθη. Προβλήματα κατά την εκπόνηση της εργασίας παρουσιάστηκαν τόσο στο κομμάτι του προγραμματισμού όσο και στο τεχνικό κομμάτι της τρισδιάστατης εκτύπωσης και κατασκευής του χεριού, τα οποία όμως αντιμετωπίστηκαν με επιτυχία.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοπτικά ήταν τα ακόλουθα:

- Η εκτύπωση 3D κομματιών δεν είναι μια τυπική διαδικασία με προκαθορισμένες κινήσεις που θα επιφέρουν το ίδιο επιτυχημένο αποτέλεσμα. Κάθε κομμάτι έχει ξεχωριστή γεωμετρία και πολλές φορές διαφορετική χρήση, γεγονός που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν όταν γίνεται αλλαγή των μεταβλητών της εκτύπωσης.
- Εξαιρώντας τους εκτυπωτές που η χρηματική τους αξία ανέρχεται σε τετραψήφιους αριθμούς, καθώς πρόκειται για εκτυπωτές που βρίσκουν εφαρμογή στις βιομηχανίες,

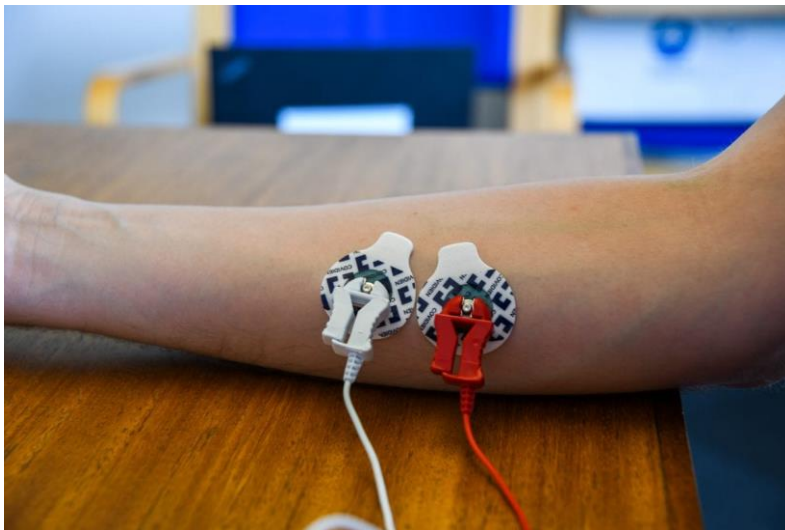
οι περισσότεροι FDM εκτυπωτές οικιακής χρήσης αντιμετωπίζουν προβλήματα οδηγώντας στην αναγκαστική διακοπή της εκτύπωσης. Κάποια από αυτά τα προβλήματα αφορούν το νήμα κατά την διαδικασία τοποθέτησης των ετάλληλων φύλλων με αποτέλεσμα ακόμα και την καταστροφή της κατασκευής. Έτσι λοιπόν ενώ πρόκειται για μια αρκετά γρήγορη μέθοδο, πολλές φορές η επιδιόρθωση προβλημάτων μπορεί να διαρκέσει μεγάλο χρονικό διάστημα.

- Η δημιουργία ενός μηχανικού χεριού πλέον μπορεί να επιτευχθεί με αρκετά χαμηλό κόστος, ακόμα και με το χειρισμό αναλογικών μέσων. Επίσης υπάρχει μεγάλη πληθώρα επιλογών έτοιμων σχεδίων έτσι ώστε να ικανοποιούν τις ανάγκες των περισσότερων χρηστών.

### XVIII. Προτάσεις για μελλοντική επέκταση

Παρά την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης και επέκτασης της έρευνας σχετικά με τον έλεγχο κίνησης του χεριού και την ακρίβεια των κινήσεων. Κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα αναλύονται παρακάτω.

Σαφώς και η χρήση ποτενσιόμετρων μπορεί να προσφέρει μια σχετική άνεση και ευκολία στον χειρισμό της κατασκευής, αλλά θα αποτελούσε ιδιαίτερη πρόκληση να πραγματοποιήσει το ρομποτικό χέρι ακριβώς τις ίδιες κινήσεις που θα έκανε την ίδια στιγμή ένα πραγματικό χέρι. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιτευχθεί με την χρήση EMG (electromyogram) αισθητήρων, βέβαια η εφαρμογή τους δεν είναι το ίδιο εύκολη. Οι αισθητήρες EMG καταγράφουν την κίνηση των μυών και κάθε φορά που συστέλλεται ένας μυς καταγράφεται μια μικρή έκρηξη ηλεκτρικής δραστηριότητας μέσω των γειτονικών ιστών.



Εικόνα 43: Χρήση EMG αισθητήρων [25]

Η δυσκολία της εφαρμογής τους, δεν αφορά τόσο στην συνδεσμολογία με τον μικροεπεξεργαστή και την κατασκευή άλλα περισσότερο στην ορθή τοποθέτησή τους πάνω στο ανθρώπινο χέρι. Για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος θα πρέπει να

τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε το σήμα από κάθε μυ να είναι και διακριτό αλλά και να μη παρεμβαίνετε από κάποιο άλλο πλησιέστερο.

## XIX. Βιβλιογραφία

- [1] Thomasnet. *History of Robots and Robotics*. Available: <https://www.thomasnet.com/articles/automation-electronics/history-of-robotics/>
- [2] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, "An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1286-1296, 2019/01/01/ 2019.
- [3] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172-196, 2018/06/15/ 2018.
- [4] C. Woodford. (2020). *How 3D printers work*. Available: <https://www.explainthatstuff.com/how-3d-printers-work.html>
- [5] Z.-X. Low, Y. T. Chua, B. M. Ray, D. Mattia, I. S. Metcalfe, and D. A. Patterson, "Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques," *Journal of Membrane Science*, vol. 523, pp. 596-613, 2017/02/01/ 2017.
- [6] T. Hoffman. (2018). *3D Printers Filaments Explained*. Available: <https://www.pcmag.com/how-to/3d-printer-filaments-explained>
- [7] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, and R. C. Advincula, "Mechanical characterization of 3D-printed polymers," *Additive Manufacturing*, vol. 20, pp. 44-67, 2018/03/01/ 2018.
- [8] J.-Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials," *Applied Materials Today*, vol. 7, pp. 120-133, 2017/06/01/ 2017.
- [9] B. Goldschmidt. (2020). *3D Printer Material Cost: The Real Cost*. Available: <https://all3dp.com/2/3d-printer-material-cost-the-real-cost-of-3d-printing-materials/>
- [10] Wikipedia. *Nylon*. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nylon>
- [11] M. Industry. *Nylon 3D printing*. Available: <https://www.makerbot.com/stories/design/nylon-3d-printing/>
- [12] S. Knowlton, S. Onal, C. H. Yu, J. J. Zhao, and S. Tasoglu, "Bioprinting for cancer research," *Trends in Biotechnology*, vol. 33, no. 9, pp. 504-513, 2015/09/01/ 2015.
- [13] Q. Yan *et al.*, "A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications," *Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 729-742, 2018/10/01/ 2018.
- [14] C. L. Ventola, "Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses," (in eng), *P & T : a peer-reviewed journal for formulary management*, vol. 39, no. 10, pp. 704-711, 2014.
- [15] D. p. f. scratch. *Types of 3D printers or 3D printing technologies overview*. Available: <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>
- [16] Wikidot.com. *Printing techniques*. Available: <http://3dprinter-innovation.wikidot.com/printing-techniques>
- [17] (2017). *SLA – Stereolithography (and DLP, CDLP, CLIP)*. Available: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/sla-stereolithography-dlp-cdlp-clip/>

- [18] B. O'Neal. (2019). *ABS: Researchers Test Temperature & Speed Settings in FDM 3D Printing*. Available: <https://3dprint.com/236571/abs-researchers-test-temperature-speed-parameters-3d-printing/>
- [19] WhiteClouds. *Selective Laser Sintering (SLS)*. Available: <https://www.whiteclouds.com/3DPedia/sls.html>
- [20] (2014). *Electronic Beam Melting (EBM)*. Available: <https://hagenzach.wixsite.com/imagine-that-3d-old/single-post/2014/01/25/Electronic-Beam-Melting-EBM-%C2%AE>
- [21] J.-P. Vasseur and A. Dunkels, "Chapter 11 - Smart Object Hardware and Software," in *Interconnecting Smart Objects with IP*, J.-P. Vasseur and A. Dunkels, Eds. Boston: Morgan Kaufmann, 2010, pp. 119-145.
- [22] Arduino. *Arduino*. Available: <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
- [23] S. Nasreen, M. Rokunuzzaman, and S. Biswas, *Assessment of Surface Roughness Using LVDT: A Convenient and Inexpensive Way of Measuring Surface Irregularities*. 2017.
- [24] (c2021). *C - Scope Rules*. Available: [https://www.tutorialspoint.com/cprogramming/c\\_scope\\_rules.htm](https://www.tutorialspoint.com/cprogramming/c_scope_rules.htm)
- [25] B. Farnsworth. (2018). *What Is EMG (Electromyography) and How Does It Work?* Available: <https://imotions.com/blog/electromyography-101/>